

Изменения интенсивности космических лучей сверхвысоких энергий по данным якутской установки ШАЛ

А. В. Глушков¹⁾, М. И. Правдин

Институт космофизических исследований и астрономии Якутского научного центра Сибирского отделения РАН
677891 Якутск, Россия

Поступила в редакцию 20 октября 2000 г.

После переработки 7 декабря 2000 г.

Приведены результаты анализа частоты прихода космических лучей с энергиями $E_0 \geq 4 \cdot 10^{17}$ эВ по данным Якутской установки за 24 года ее непрерывной работы (1977–2000 гг.). Показано, что они имеют переменную интенсивность. При $E_0 \leq (3 - 5) \cdot 10^{18}$ эВ наблюдается много отклонений 2–3-месячных данных от среднего уровня на $(3 - 4)\sigma$. В области энергий $E_0 \geq 10^{19}$ эВ имеет место устойчивый спад интенсивностей, в среднем в 1.5 раза за рассмотренный период времени.

PACS: 96.40.-z, 98.70.-f

1. Введение. Космические лучи сверхвысоких энергий ($E_0 \geq 10^{17}$ эВ) все еще остаются загадочными, хотя исследуются во всем мире на установках широких атмосферных ливней (ШАЛ) более 40 лет. Первичные частицы с $E_0 \geq 10^{19}$ эВ изучены совсем плохо из-за очень низкого их потока. До сих пор 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 какие-то новые процессы развития ШАЛ.

Обнаружение источников космических лучей сверхвысоких энергий может помочь решению этой проблемы, хотя здесь тоже много трудностей. Недавно появились сообщения [4, 5] об обнаружении кластеров в направлениях прихода частиц с $E_0 \geq 10^{19}$ эВ. В работе [4] найдена связь их с пульсарами, расположенными в стороне входа Местного рукава Галактики. В глобальном масштабе частицы таких энергий не противоречат изотропному распределению, хотя и указывают на некоторую корреляцию в направлениях прихода с плоскостью Галактики (см., например, [6, 7]), а также с плоскостью Сверхгалактики [8, 9].

В работе [9] показано, что избыточный поток космических лучей со стороны плоскости Сверхгалактики меняется во времени. В этой работе представлены экспериментальные результаты, которые проливают дополнительный свет на проблему изменений интенсивности космических лучей сверхвысоких энергий.

2. Исследуемые характеристики и обсуждения. Ниже рассмотрены ШАЛ с энергиями $E_0 \geq$

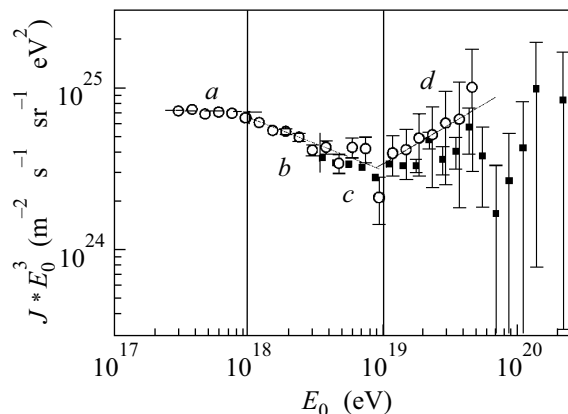


Рис.1. Энергетические спектры космических лучей сверхвысоких энергий: О – данные Якутской установки ШАЛ [10]. Линиями показаны изменения интенсивности по степенному закону с параметрами, подобранными по экспериментальным точкам в разных энергетических диапазонах: $a - E_0 < 10^{18.0}$ эВ ($\gamma_a = -3.05 \pm 0.04$), $b - c - 10^{18} \leq E_0 < 10^{19.0}$ эВ ($\gamma_{bc} = -3.34 \pm 0.05$), $d - E_0 \geq 10^{19.0}$ эВ ($\gamma_d = -2.53 \pm 0.25$); ■ – данные установки AGASA [11]

$\geq 4 \cdot 10^{17}$ эВ и зенитными углами $\theta \leq 50^\circ$, зарегистрированные на Якутской установке за период 1977–2000 гг. Исследованы частоты их прихода в нескольких интервалах ΔE_0 ($a - (0.4 - 1) \cdot 10^{18}$, $b - (1 - 3) \cdot 10^{18}$, $c - (3 - 10) \cdot 10^{18}$ и $d - \geq 10^{19}$ эВ), имеющих разные локальные наклоны первичного энергетического спектра (рис.1). Энергия первичных частиц находилась из соотношений

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

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

¹⁾e-mail: a.v.glushkov@sci.yakutia.ru

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

где $\rho(\theta)$ – плотность заряженных частиц, измеряемая наземными сцинтилляционными детекторами на расстоянии $R = 600$ м от оси ливня.

Темными квадратами на рис.1 показан энергетический спектр, измеренный на установке AGASA [11]. Эта установка схожа с нашей по типу детекторов, методике регистрации и обработки данных. Видно, что оба спектра при $E_0 \leq 6 \cdot 10^{19}$ эВ в пределах ошибок согласуются между собой по форме. Мы обращаем внимание на факт заметного уположения спектров в области энергий $E_0 \geq 10^{19}$ эВ. Вопрос о частицах с $E_0 \sim 10^{20}$ эВ требует отдельного исследования. Он не влияет на те выводы, о которых говорится ниже.

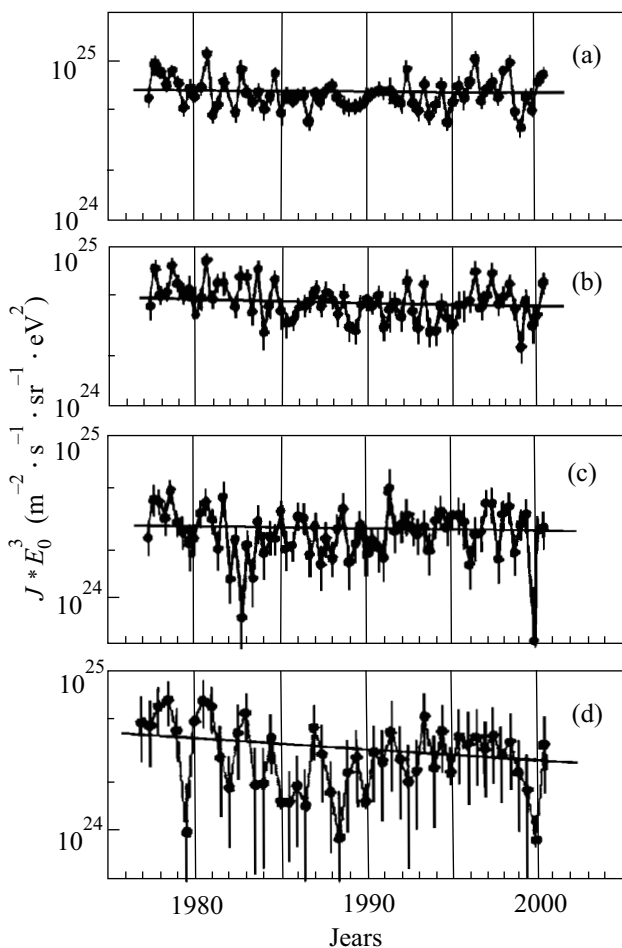


Рис.2. Интенсивности космических лучей по годам их прихода в разных диапазонах энергий по данным Якутской установки: (а) – $E_0 < 10^{18.0}$ эВ (6684 ливня), (б) – $10^{18} \leq E_0 < 3 \cdot 10^{18.0}$ эВ (3253 ливня), (с) – $3 \cdot 10^{18} \leq E_0 < 10^{19.0}$ эВ (1331 ливень), (д) – $E_0 \geq 10^{19.0}$ эВ (214 ливней); • – эксперимент, прямая линия – аппроксимации данных линейными функциями

На рис.2 показаны изменения интенсивностей прихода космических лучей по годам в указанных выше интервалах энергий. Для спектров (а) и (б) взяты только те ливни, оси которых попали в центральный круг установки с радиусом $R \leq 500$ м, а для спектров (с) и (д) – с $R \leq 1700$ м. Они регистрировались установкой с эффективностью ~ 1 . Это обеспечивалось требованием, чтобы хотя бы один мастерный треугольник (“мастер”) включал в себя станции с числом зарегистрированных ими частиц ≥ 8 . Количество и конфигурация “мастеров” при анализе ливней не менялись. События с $E_0 \leq 3 \cdot 10^{18}$ эВ отбирались 7 станциями, образующими с центральной станцией 6 “мастеров” со сторонами 500 м; остальные – 24 “мастерами” из треугольников со сторонами 1000 м.

Линиями на рис.2 показаны аппроксимации полученных данных линейными функциями. Видно, что при $E_0 \leq 10^{18}$ эВ усредненный поток космических лучей за рассмотренный период времени не менялся. Отдельные точки (локальные интенсивности за 2–3 месяца) отличаются от среднего в ~ 1.5 раза, нередко отклоняются на $(3 - 4)\sigma$. Разброс точек между средними минимальным и максимальным уровнями составляет $\Delta J \approx 1.5$.

В интервале $10^{18} \leq E_0 \leq 10^{19}$ эВ поток первичных частиц также почти не изменился, хотя, возможно, есть слабое указание на его спад. Разброс локальных интенсивностей на рис.2b увеличился до $\Delta J \approx 2$, а на рис.2c – до $\Delta J \approx 2.5$. Многие точки на рис.2b по-прежнему отклоняются от среднего на $(3 - 4)\sigma$. Спектры (а) и (б) сильно коррелируют между собой по форме, с вероятностью случайного совпадения $P < 10^{-5}$. Сами точки отклоняются от линейных аппроксимаций за пределы случайного разброса ($P < 10^{-5}$).

При $E_0 \geq 10^{19}$ эВ наблюдается устойчивый спад интенсивностей по линейному закону (со скоростью $\Delta \log J / \Delta T = 0.008 \pm 0.004$ за 1 год). Более того, в 1982–87 гг. имелся относительный провал частоты прихода ливней в 1.5–2 раза. Это хорошо видно на рис.3а, где каждая точка соответствует средней годовой интенсивности событий с $E_0 \geq 8 \cdot 10^{18}$ эВ и $\cos \theta \geq 0.6$, упавших в центральный круг установки с радиусом ≤ 1900 м. Отклонения 24 показаний от линейной аппроксимации дают $\chi^2 = 43.6$, с вероятностью случайного такого исхода $P \approx 10^{-2}$. Если сгладить эти точки линейным сплайном (по ± 3 соседним событиям), то получим штриховую кривую ($\chi^2 = 28.2$). Эта кривая в пределах ошибок не противоречит эксперименту ($P \approx 0.24$).

Изменения интенсивностей на рис.2 не вызваны технической стороной работы Якутской установки

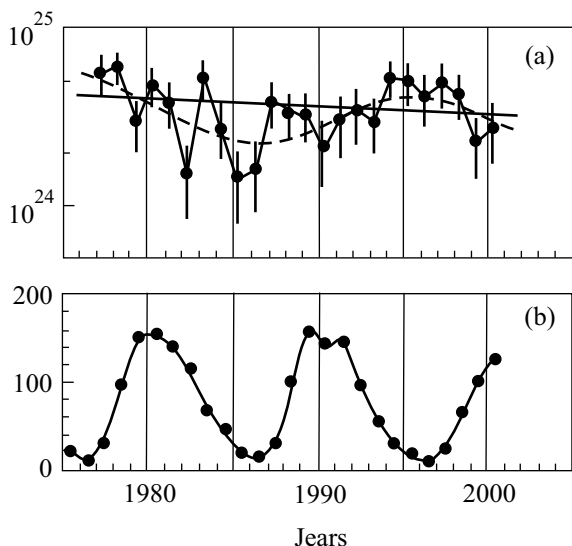


Рис.3. (а) Интенсивности космических лучей по годам их прихода при $E_0 \geq 8 \cdot 10^{18.0}$ эВ (287 ливней): прямая линия – аппроксимации данных линейными функциями и штриховая кривая – линейными сплайнами по ± 3 соседним точкам; (б) – средние годовые числа Вольфа [12]

или методикой отбора и обработки ливней. Чтобы исключить самое невероятное предположение, на рис.3б приведены средние годовые числа Вольфа [12]. Они указывают на отсутствие влияния солнечных циклов на полученные результаты (за счет, может быть, гипотетически не известных механизмов).

Наблюдаемые особенности частоты прихода ШАЛ обусловлены какими-то физическими процессами. Сопоставляя данные на рис.1 и рис.2, можно предположить следующее. События с $E_0 \leq (3 - 5) \cdot 10^{18}$ эВ генерируются, по-видимому, в Галактике. Глобальный их поток за длительный период времени (десятки лет), скорее всего, остается неизменным. Для более определенных выводов по этой проблеме нужно расширить ряд наблюдений (хотя бы удвоить). Что касается локальных вариаций интенсивностей (за 1–2 г.), то они могут быть связаны с какими-то меняющимися условиями распространения космических лучей сверхвысоких энергий.

Космические лучи с энергиями $E_0 \geq (8 - 10) \cdot 10^{18}$ эВ в большинстве своем имеют, скорее всего, внегалактическую природу. На это указывают корреляции местоположений “колена” на рис.1 и северной асимметрии в направлениях прихода частиц таких энергий по отношению к плоскости Галактики (с избытком их из южных направлений) [7]. Позже выяснилось [8, 9], что этот избыток идет со стороны плоскости Сверхгалактики и имеет переменную интенсивность [9]. На рис.3а видны новые детали его

неустойчивого во времени характера. Не исключено, что линейный спад в 1977–2000 годы является лишь частью каких-то долговременных (сотни лет) колебаний интенсивности космических лучей указанных энергий (возможно, периодических или спорадических). На эти колебания наложены другие, более короткие (штриховая кривая на рис.3а). Чем они вызваны, можно только предполагать. Необходимо продолжить наблюдения. Большой интерес в этом вопросе представляют данные других мировых установок ШАЛ.

3. Из приведенных выше данных видно, что дополнительная информация о первичных частицах заключена в “анизотропии” времени их прихода, исследование которой может помочь решению проблемы происхождения космических лучей сверхвысоких энергий. Здесь имеются указания на переменную их интенсивность. Пока трудно сказать, какими процессами (генерацией или условиями распространения) они вызваны. При $E_0 \geq 10^{19}$ эВ наблюдается устойчивый спад интенсивностей. Не учет этого обстоятельства при сравнении энергетических спектров космических лучей, измеренных в разное время, может привести к ошибочным выводам.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки России Якутской комплексной установки ШАЛ (регистр. # 01-30), включенной в “Перечень уникальных научно-исследовательских и экспериментальных установок национальной значимости”.

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. А. А. Mikhailov, Proc. 26th ICRC **3**, 268 (1999).
5. M. Takeda, N. Hayashida, K. Honda et al., The Astrophysical Journal **522**, 225 (1999).
6. J. Szabelsky, J. Wdowczyk, and A. W. Wolfendale, J. Phys., G. **12**, 1433 (1986).
7. B. N. Afanasiev, M. N. Dyakonov, T. A. Egorov et al., Proc. 24th ICRC **2**, 756 (1995).
8. T. Stanev et al., Phys. Rev. Lett. **75**, 3056 (1995).
9. А. В. Глушков, И. Е. Слепцов, Изв. РАН., сер. физ., в печати (2001).
10. M. I. Pravdin, M. N. Dyakonov, A. V. Glushkov et al., Proc. 26th ICRC **3**, 292 (1999).
11. M. Takeda, N. Hayashida, K. Honda et al., Phys. Rev. Lett. **81**, 1163 (1998).
12. <http://sidc.oma.be/html/sunspot.html>