

Зависимость энергетического спектра космических лучей сверхвысоких энергий от широты расположения установок ШАЛ

А. В. Глушков¹⁾, М. И. Правдин

Институт космофизических исследований и аэронавтики Якутского научного центра им. Ю.Г. Шафера Сибирского отд. РАН
677891 Якутск, Россия

Поступила в редакцию 16 января 2008 г.

После переработки 29 февраля 2008 г.

Рассмотрен ряд энергетических спектров космических лучей с энергией $E_0 \geq 10^{17}$ эВ, измеренных в разное время на Якутской установке ШАЛ, AGASA, Haverah Park, HiRes, Auger и SUGAR. Показано, что все спектры достаточно хорошо согласуются между собой по форме, если изменить у них энергию в K раз. Сами коэффициенты K для каждого спектра индивидуальны и имеют ярко выраженную северо-южную зависимость от географической широты расположения названных выше установок.

PACS: 95.30.–k, 96.40.–z, 98.70.–f

1. Введение. Энергетический спектр космических лучей сверхвысоких энергий ($E_0 \geq 10^{17}$ эВ) является ключевым звеном в цепи сложных проблем понимания происхождения первичных частиц с такой энергией. Гигантские атмосферные ливни (ГАЛ) с предельной энергией $E_0 \geq 10^{19}$ эВ вызывают огромный интерес почти 40 лет: с первых событий, зарегистрированных на крупнейших мировых установках Volcano Ranch (США) [1], Haverah Park (Англия) [2], SUGAR (Sydney University Giant Airshower Recorder) [3] и в Якутске [4]. Во многом этот интерес обусловлен наблюдаемым всеми установками в указанной области энергии резким изменением формы спектра и существенным отличием разных спектров по интенсивности. Это хорошо видно на рис.1а, где представлены статистически значимые к 1987 г. результаты. Светлыми кружками изображен дифференциальный спектр SUGAR, представленный авторами [5] в окончательном виде после закрытия этой установки. Темными кружками, а также светлыми и темными треугольниками показан спектр Якутской установки [6]. Крестиками изображен спектр Haverah Park [7]. Наклонная линия проведена через характерные провалы (dip) спектров. Она соответствует изменению интенсивности в $3\Delta \log E_0$ раз при изменении энергии в $\Delta \log E_0$. В спектрах SUGAR и Haverah Park имеются события с $E_0 \geq 10^{20}$ эВ. Они противоречат ожидаемому из теоретических представлений Грейзена, Зацепина и Кузьмина крутому спаду спектра при $E_0 \geq 6 \cdot 10^{19}$ эВ (ГЗК-обрезанию) за счет интенсивного взаимодействия ГАЛ с микроволновым фоновым излучением [8, 9]. Якутский

спектр имеет четко выраженные провалы (dip) при $E_0 \approx 8 \cdot 10^{18}$ эВ и горб (bump) при $E_0 \approx 5 \cdot 10^{19}$ эВ, а далее он не противоречит ГЗК-обрезанию.

Проблема ГЗК-обрезания стимулировала создание ряда новых, более светосильных установок AGASA (Akeno Giant Air Shower Array) и Fly's Eye – HiRes (США). С ними связывались многие надежды на окончательное решение проблемы происхождения ГАЛ. Но этого не произошло. Дополнительную интригу внесла недавно запущенная сверхгигантская установка Auger (с площадью 3000 км²) в Аргентине, которая летом 2007 г. представила на 30-й Международной конференции по космическим лучам в Мексике ряд сенсационных работ (см. обзоры [10, 11]).

Мы рассматриваем здесь проблему энергетического спектра космических лучей сверхвысоких энергий в историческом контексте, без какого-либо отбора тех или иных результатов, даже если они кажутся устаревшими и не совсем надежными. Это дает более полную картину самой проблемы измерения спектра и открывает некоторые новые возможности ее решения.

2. Экспериментальные результаты и обсуждение. Вернемся вновь к рис.1а, на котором видно, что все три спектра достаточно хорошо согласуются между собой по форме. Напомним, что энергия первичных частиц на установке SUGAR находилась из полного числа вертикальных мюонов с порогом $E_\mu = 0.75 \text{ sec } \vartheta$ ГэВ. На установке Haverah Park для этого использовался пересчет к энергии от ρ_{600} -плотности заряженных частиц, измеряемой наземными водяными черенковскими баками толщиной 1.2 м на расстоянии 600 м от оси ШАЛ. На Якутской установке делался пересчет от S_{600} к E_0 , где S_{600} – плот-

¹⁾e-mail: a.v.glushkov@ikfia.ysn.ru

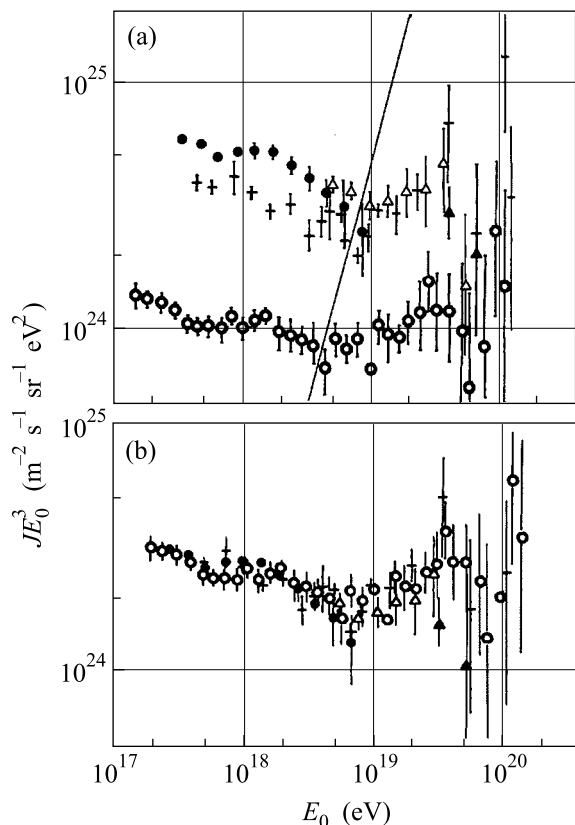


Рис.1. Дифференциальные энергетические спектры: (а) \circ – SUGAR для ливней с зенитными углами $\vartheta \leq 60^\circ$ [5]; $+$ – Naverah Park [7]; \bullet , Δ – малый (500 м) и большой (1000 м) мастера соответственно для ливней, зарегистрированных внутри Якутской установки с $\vartheta \leq 45^\circ$; \blacktriangle – ливни Якутской установки с $\vartheta \leq 60^\circ$ и расширенной до 30 км^2 площадью [6]; (б) те же спектры после изменения их энергии в $K = 1.29, 0.9$ и 0.81 раз, соответственно

ность заряженных частиц, измеряемая наземными сцинтилляционными детекторами (толщиной 5 см и площадью 2 м^2) на расстоянии 600 м от оси ШАЛ.

Можно предположить (как в [12]), что наблюдаемое различие в интенсивности спектров связано с какими-то методическими особенностями того или иного эксперимента: например, с неточностью определения E_0 . Попробуем сблизить спектры на рис.1а между собой максимально близко, смещая их вдоль наклонной линии к некоторому определенному положению. Выберем его условно таким образом, чтобы при $E_0 = 3.15 \cdot 10^{18} \text{ эВ}$ и $1.4 \cdot 10^{19} \text{ эВ}$ интенсивности степенных аппроксимаций $J(E_0) \sim E_0^{-\gamma}$ в интервалах энергий $(1-8) \cdot 10^{18} \text{ эВ}$ и $(8-50) \cdot 10^{18} \text{ эВ}$ равнялись $J E_0^3 = 2 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1} \text{ эВ}^2$, а показатели спектра в этих интервалах равнялись $\gamma = 3.2$ и 2.68 , соответственно. Для этого нужно изменить энергию на Якутской установке, Naverah Park и SUGAR в $K = 0.81 \pm 0.05, 0.9 \pm 0.07$ и 1.29 ± 0.1 раз, соот-

ветственно. Коэффициенты K и их ошибки находились методом χ^2 -теста. Результаты такой процедуры показаны на рис.1б. Мы видим здесь достаточно хорошее согласие форм всех трех спектров во всем диапазоне сверхвысоких энергий. Если усреднить точки между собой, то получим спектр, изображенный на рис.2. Он имеет четко выраженные dip при

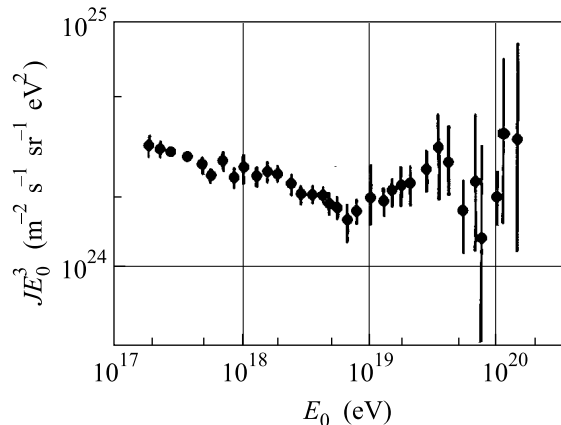


Рис.2. Дифференциальный энергетический спектр после усреднения точек на рис.1б

$E_0 \approx 8 \cdot 10^{18} \text{ эВ}$ и bump при $E_0 \approx 4 \cdot 10^{19} \text{ эВ}$. Несколько ГАЛ с $E_0 \geq 10^{20} \text{ эВ}$ делают проблему существования ГЗК-обрезания пока неразрешимой.

Такая ситуация с энергетическим спектром космических лучей сверхвысоких энергий сложилась к моменту появления данных новых установок AGASA [13], HiRes [14] и Auger [10]. На рис.3а приведены дифференциальные спектры этих установок совместно со спектрами рис.1а. Мы лишь заменили здесь наши данные на самые последние [15]. Заметим, что на AGASA использовались схожие с Якутской установкой сцинтилляционные детекторы и методика оценки E_0 из S_{600} . По-видимому, это нашло свое отражение в достаточно близких по форме и интенсивности спектрах обеих установок. Исключение здесь составляют 11 ГАЛ с $E_0 \geq 10^{20} \text{ эВ}$ на AGASA и всего лишь одно такое событие на Якутской установке. На установках HiRes и Auger энергия первичных частиц находилась из флуоресцентного свечения атмосферы в результате развития ШАЛ. Однако энергия подавляющего большинства ГАЛ на установке Auger определялась все же из ρ_{1000} – плотность заряженных частиц на расстоянии 1000 м от оси ШАЛ, измеряемой водяными черенковскими баками толщиной 1.2 м.

Видно, что новые спектры еще больше запутали общую картину. Во-первых, довольно странным оказалось сильное различие интенсивности спектров HiRes и Auger, в основе которых лежит одинаковая

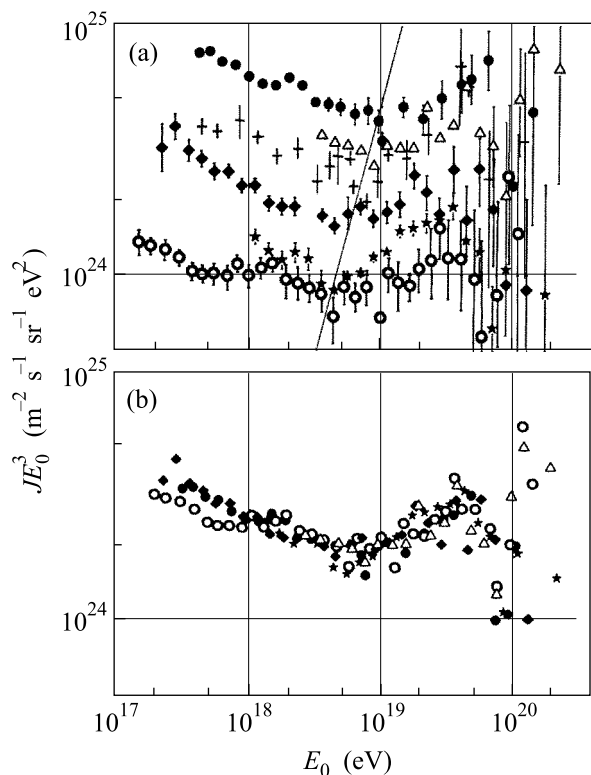


Рис. 3. Дифференциальные энергетические спектры: (а) ● – Якутская установка (с зенитными углами $\vartheta \leq 60^\circ$) [15]; Δ – AGASA ($\vartheta \leq 60^\circ$) [14]; + – Haverah Park ($\vartheta \leq 60^\circ$) [7]; \blacklozenge – HiRes [14]; \star – Auger ($\vartheta \leq 70^\circ$) [10]; \circ – SUGAR ($\vartheta \leq 60^\circ$) [5]; (б) те же спектры после изменения их энергии в $K = 0.75, 0.85, 0.9, 1.02, 1.19$ и 1.29 раз, соответственно

оценка энергии первичных частиц из флуоресцентного свечения ШАЛ. Во-вторых, еще больше удивляет различие спектров Haverah Park и Auger. Ведь на обеих этих установках в качестве основных детекторов использованы однотипные водяные черенковские баки. Руководитель этих установок Ватсон ничего не говорит на этот счет. В-третьих, спектры Auger и SUGAR оказались удивительно схожими между собой. Очень низкая интенсивность последнего вызвала к нему в свое время недоверие и, к сожалению, он был надолго забыт. Но, как мы видим теперь, у спектра SUGAR нашелся достойный последователь. Такой широкий набор разных спектров заставляет искать какую-то общую причину их разногласия.

Нетрудно убедиться, что все спектры на рис.3а достаточно близки между собой по форме. Для этого нужно всего лишь изменить энергию спектров Якутской установки, AGASA, HiRes и Auger в $K = 0.75 \pm 0.04, 0.85 \pm 0.06, 1.02 \pm 0.07$ и 1.19 ± 0.11 раз, соответственно. Результаты показаны на рис.3б, где

для удобства восприятия ошибки не изображены. Такую относительную нормировку спектров между собой предлагают Березинский и др. [12]. Они полагают, что абсолютный поток космических лучей сверхвысоких энергий сам по себе изотропен, а вся проблема разногласия между спектрами заключена в ошибках оценки энергии на той или иной установке. С этим можно в какой-то мере согласиться. Однако обратим внимание на один любопытный факт, следующий из рис.3а и представленный на рис.4. Он демон-

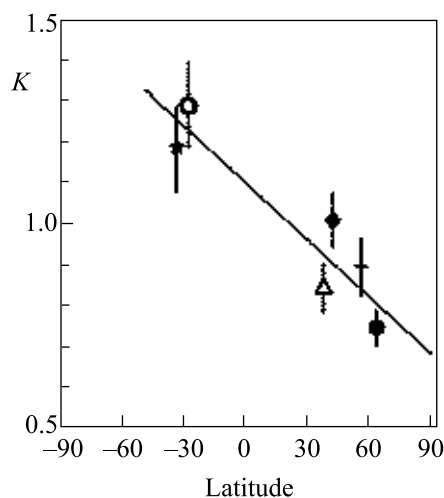


Рис.4. Зависимость нормировочных коэффициентов от широты расположения установок (обозначения аналогичны рис.3)

стрирует определенную зависимость нормировочных коэффициентов K от географической широты расположения рассмотренных нами установок: чем южнее находится установка, тем ниже проходит спектр. Такую закономерность трудно воспринимать как случайную, вызванную лишь одними методическими ошибками определения E_0 . Вероятно, причина здесь какая-то другая.

3. Заключение. Мы рассмотрели шесть спектров космических лучей сверхвысоких энергий, измеренных в разное время на разных мировых установках ШАЛ. Эти спектры имеют достаточно хорошую статистическую обеспеченность и вызывают к себе постоянный интерес. Они основаны на регистрации разных компонент ШАЛ, включают в себя разные методы обработки данных. Мы видим, что все спектры оказались разными (рис.3а). Наибольший интерес в последние годы вызывают результаты установок HiRes и Auger. Некоторые исследователи склонны обсуждать лишь эти результаты. Мы считаем, что какая-либо избирательность здесь вряд ли полезна делу. Нужен комплексный подход, стремле-

ние понять всю совокупность данных. Метод нормировки спектров [12] демонстрирует на рис.3b хорошее согласие всех спектров по форме. Однако наблюдаемое различие спектров по интенсивности обусловлено, вероятно, не столько ошибками оценки энергии на разных установках, сколько их обзором разных областей неба. В работах [16,17] мы уже демонстрировали на примере данных Якутской установки, что энергетические спектры из разных областей неба заметно отличаются друг от друга. Все это требует дальнейшего углубленного исследования, которое мы намерены продолжить.

-
1. J. Linsley, Phys. Rev. Lett. **10**, 146 (1963).
 2. D. M. Edge, A. C. Evans, H. J. Garmston et al., J. Phys. A **6**, 1612 (1973).
 3. C. J. Bell et al., Phys. A **7**, 990 (1974).
 4. D. D. Krasilnikov, A. I. Kuzmin, J. Linsley et al., J. Phys. A **7**, 176 (1974).
 5. L. Horton, C. B. A. McCusker, M. N. Dyakonov et al., in *Proc. 18th ICRC, Bangalore*, vol. 2, 1983, p. 128.
 6. A. V. Glushkov et al., in *Proc. 20th ICRC, Moscow*, vol. 5, 1987, p. 494.
 7. M. A. Lawrence, R. J. O. Reid, and A. A. Watson, J. Phys. G **17**, 733 (1991).
 8. K. Greisen, Phys. Rev. Lett. **16**, 748 (1966).
 9. Г. Т. Зацепин, В. А. Кузьмин, Письма в ЖЭТФ **4**, 114 (1966).
 10. http://www.auger.org/technical_info/pdfs/icrc2007/Watson_Merida_Highlights.pdf.
 11. V. Berezhinsky, arXiv: 0710.2750v2.
 12. V. Berezhinsky, A. Z. Gazizov, and S. I. Grigorieva, hep-ph/0204357.
 13. K. Shinozaky et al., Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) **3**, 151 (2006).
 14. R. U. Abbasi, T. Abu-Zayyad, M. Allen et al., Phys. Rev. Lett. **92**, 151101 (2004); astro-ph/0703.099.
 15. V. P. Egorova, A. V. Glushkov, A. A. Ivanov et al., Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) **3**, 136 (2004).
 16. А. В. Глушков, М. И. Правдин, ЖЭТФ **128**, 103 (2005).
 17. А. В. Глушков, ЯФ **70**, 353 (2007).