

Спектр космических лучей, найденный по энергии, рассеянной частицами ШАЛ в атмосфере, и галактическая модель

С. П. Кнуренко¹⁾, А. А. Иванов¹⁾, А. В. Сабуров¹⁾

Институт космофизических исследований и аэронауки им. Ю.Г. Шафера Сибирского отд. РАН
677980 Якутск, Россия

Поступила в редакцию 20 сентября 2007 г.

После переработки 9 октября 2007 г.

Проведено сравнение дифференциального энергетического спектра космических лучей, полученного на основе измерений черенковского излучения ШАЛ в диапазоне энергий $10^{15} - 10^{20}$ эВ, с диффузионной моделью распространения первичных частиц в межзвездной среде с фрактальными свойствами. Обнаружено хорошее соответствие формы спектра между экспериментальными данными и рассчитанным спектром “всех частиц” при $10^{15} - 10^{18}$ эВ. В данном случае средний массовый состав космических лучей, рассчитанный по пяти компонентам, не противоречит среднему массовому составу, полученному из экспериментальных данных по нескольким параметрам в этой области энергий.

PACS: 13.40.-f, 13.85.Tr

1. Введение. Открытие нерегулярностей в энергетическом спектре космических лучей (КЛ) при энергии $\sim 3 \cdot 10^{15}$ эВ (Христиансен и др., 1956 [1]) и $\sim 8 \cdot 10^{18}$ эВ (Красильников и др., 1978 [2–4]), обнаружение резкого уменьшения интенсивности КЛ выше $5 \cdot 10^{19}$ эВ (эффект Грейзена-Зацепина-Кузьмина, 1966 [5]) на установках широких атмосферных ливней (ШАЛ) в Якутске, HiRes (США), Auger (Аргентина), является важнейшим достижением в исследовании КЛ сверхвысоких и предельных энергий за последнее время. Оказалось, что такой характер спектра напрямую связан с процессами, происходящими в межзвездном пространстве, а именно, с происхождением, ускорением и распространением космических лучей в Галактике и за ее пределами. Интерпретация этих экспериментальных фактов с использованием различных моделей происхождения КЛ все еще остается насущной проблемой.

В настоящей работе проводится сравнение энергетического спектра КЛ, полученного на Якутской установке по измерениям черенковского света ШАЛ [6, 7], с расчетами по модели с аномальной диффузией КЛ в межзвездном пространстве [8].

2. Метод построения спектра ШАЛ. На якутской установке ШАЛ ливни отбираются центральным регистратором как по сцинтиляционному, так и по черенковскому “мастерам” [9, 10]. Все зарегистрированные ливни составляют базу данных Якутской установки.

Для построения спектра по энергии, рассеянной частицами ШАЛ в атмосфере (черенковское излучение), использовались следующие критерии отбора ливней: а) ось ливня должна находиться в пределах периметра установки для самых больших ливней и в пределах центра установки для ливней с $E_0 < 10^{18}$ эВ. Из выборки исключались ливни, чьи оси находятся вблизи станции наблюдения $R \leq 60$ м, б) вероятность регистрации ливня по черенковским фотонам была $W_{ph} \geq 0.9$, в) зенитный угол был меньше половины апертуры черенковского детектора, то есть $\theta < 55^\circ$ в случае детектора первого типа и $\theta < 60^\circ$ в случае детектора второго типа, г) коэффициент пропускания атмосферы не менее 0,60 для длины волны 430 нм.

Таким образом, в банк было записано более 60000 ливней с энергией $E_0 \geq 10^{17}$ эВ и 550000 ливней в интервале энергий $10^{15} \leq E_0 \leq 10^{17}$ эВ. Для построения спектра ливни отбирались по классификационному параметру Q_{150} – плотности потока черенковского света на расстоянии 150 м от оси, который прямо пропорционален первичной энергии ливня. Точность измерения параметра Q_{150} в индивидуальных ливнях составляла $\delta = \Delta Q_{150} / \langle Q_{150} \rangle = 15\%$.

Оценка энергии ливня E_0 определялась квазикалориметрическим методом, который не зависит от модели развития ШАЛ. Основу метода составляли экспериментальные данные о полном потоке черенковского света Φ , полном числе заряженных частиц N_s и полном числе мюонов с $E_{thr} \geq 1.0$ ГэВ N_μ [11–13]. Энергия индивидуальных ливней определялась по следующей формуле:

¹⁾s.p.knurenko@ikfia.ysn.ru; ivanov@ikfia.ysn.ru; tema@ikfia.ysn.ru

$$E_0 = (9.1 \pm 2.2) \cdot 10^{16} \cdot Q_{150}^{0.99 \pm 0.02} (\text{эВ}). \quad (1)$$

Интенсивность потока космических лучей в заданном интервале классификационного параметра ШАЛ находилась как отношение числа зарегистрированных событий ШАЛ и $S_{\text{эф}} \cdot T \cdot \Omega$, где $S_{\text{эф}}$ – эффективная площадь, T – время регистрации, Ω – телесный угол.

3. Результаты и обсуждение. На рис.1 приводится дифференциальный энергетический спектр первичных космических лучей (ПКЛ) в интервале

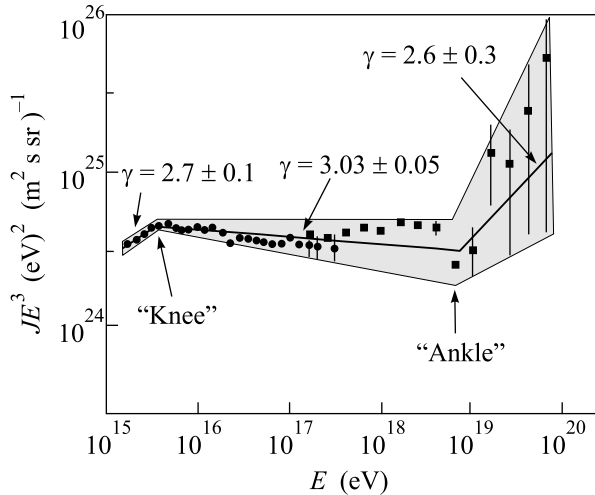


Рис.1. Энергетический спектр первичного космического излучения по данным измерений черенковского излучения на Якутской комплексной установке ШАЛ. Кружки – данные, полученные на малой черенковской установке; квадраты – данные большой черенковской установки

$10^{15} - 5 \cdot 10^{19}$ эВ, полученный по совокупности данных измерений всех черенковских детекторов Якутской установки ШАЛ. Наши данные подтверждают обнаруженную в работе [1] нерегулярность спектра в области энергий $(2 - 5) \cdot 10^{15}$ эВ типа “колено” (“knee”) и нерегулярность спектра при энергии $\sim 8 \cdot 10^{18}$ эВ типа “лодыжка” (“ankle”) [2]. Установлено, что в первом случае спектр имеет показатель степени $\gamma = 2.7 \pm 0.1$ ниже излома и $\gamma = 3.03 \pm 0.05$ при $E_0 > 3 \cdot 10^{15}$ эВ, а во втором наблюдается уположение спектра с $\gamma = 2,6 \pm 0.3$ при $E_0 > 8 \cdot 10^{18}$ эВ. За более чем 30-летний период непрерывных наблюдений черенковского излучения (наблюдения составляют $\sim 10\%$ по отношению к общему времени) на установке не было зарегистрировано ливней с энергией $E_0 > 6 \cdot 10^{19}$ эВ.

3.1. Галактическая модель. В работах Лагутина и др. [8] сделана попытка объяснить форму наблюдаемого спектра с позиции модели аномальной диффузии космических лучей и фрактальности магнитного поля Галактики. В основу распространения косми-

ческих лучей в Галактике были положены следующие предположения: а) после генерации в источниках частицы движутся во фрактальной межзвездной среде двумя путями: первый путь – как траектории Леви (Lévy flights) или второй – по спирали в неоднородном магнитном поле; б) частицы существуют аномально долгое время. Время жизни частиц имеет широкое распределение и хвост его описывается степенным законом типа $q(t) \propto B \cdot t^{-\beta-1}$, $t \rightarrow \infty$ с $\beta < 1$ (так называемое время захвата Леви – Lévy trapping time). Расчеты спектра были проведены отдельно для каждой из следующих групп ядер: p , He, CNO, N-Si, Fe. Результаты суммарного для всех частиц спектра (all particle) даны на рис.2, сплошная кривая, а в

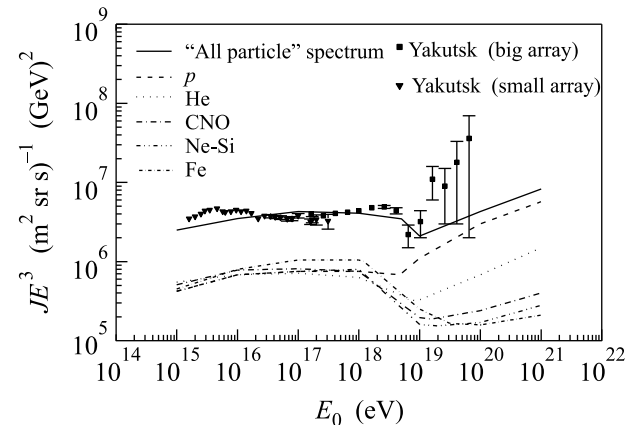


Рис.2. Зависимость дифференциальной интенсивности космических лучей от энергии. Точки – данные Якутской установки, кривые – расчет из работы [8]

таблице приводится среднее массовое число, которое получено минимизацией по пяти компонентам ядер при условии согласия с экспериментом.

Массовый состав космических лучей в галактической модели

$A, \%$ $E_0, \text{эВ}$	H	He	CNO	Ni-Si	Fe	$\langle \ln A \rangle$
$1 \cdot 10^{15}$	22	21	20	17	19	2.14
$3 \cdot 10^{15}$	20	20	20	18	21	2.24
$1 \cdot 10^{16}$	19	19	20	18	23	2.32
$3 \cdot 10^{16}$	18	18	20	19	25	2.38
$1 \cdot 10^{17}$	17	17	20	19	26	2.43
$3 \cdot 10^{17}$	17	16	20	19	27	2.45
$1 \cdot 10^{18}$	18	16	19	19	27	2.44
$3 \cdot 10^{18}$	23	15	18	18	26	2.30
$1 \cdot 10^{19}$	55	17	9	8	11	1.18
$3 \cdot 10^{19}$	65	17	7	5	6	0.80
$1 \cdot 10^{20}$	68	18	6	4	3	0.69

Из расчетов следует, что предложенная модель воспроизводит нерегулярность в энергетическом

спектре при $E_0 \simeq 3 \cdot 10^{15}$ эВ типа “колено”, а также нерегулярность типа “лодыжка” при $E_0 \simeq 8 \cdot 10^{18}$ эВ. Более детально, например, поведение спектра в области энергий $10^{17} - 10^{18}$ эВ и обрыв спектра при $E_0 > 6 \cdot 10^{19}$ эВ, данная модель не прописывает. Табличные данные указывают на изменение массового состава космических лучей сразу же за изломами в спектре. В области энергий $5 \cdot 10^{15} - 5 \cdot 10^{18}$ эВ массовый состав несколько тяжелее, чем при $E_0 \simeq 10^{19}$ эВ, но это изменение не такое сильное, как это следует из эксперимента (см. ниже рис.4).

3.2. Массовый состав первичных космических лучей. На рис.3 и 4 показаны результаты Якутской установки по массовому составу первичных кос-

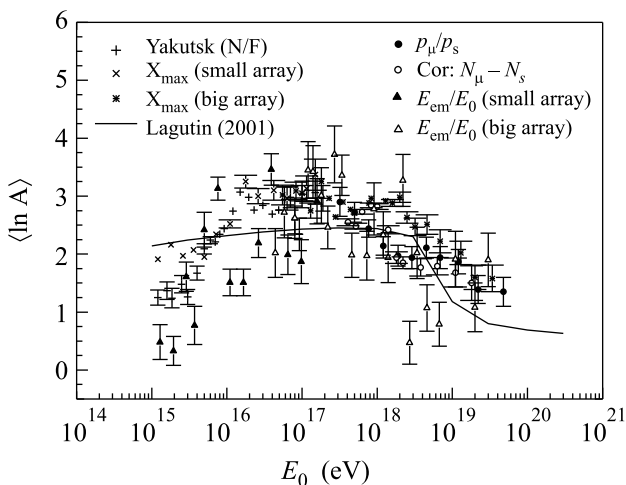


Рис.3. Массовый состав космических лучей при сверхвысоких и предельных энергиях. Кривая – расчет Лагутина и др. (2001) по аномальной диффузионной модели распространения космических лучей

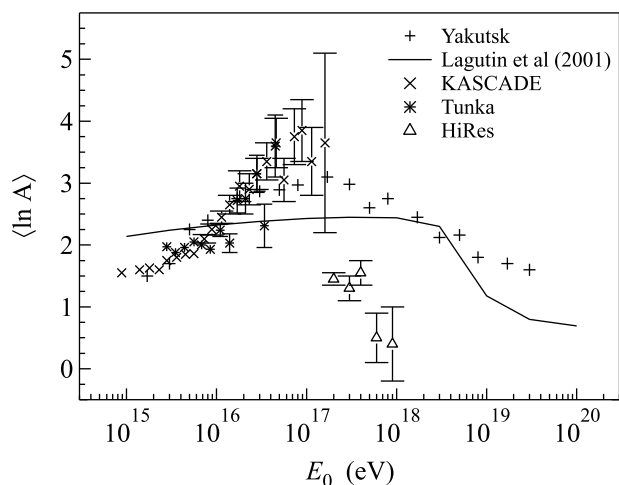


Рис.4. Сравнение усредненных Якутских данных с данными других установок

мических лучей. Данные получены в рамках модели QGSJET-01 (CORSIKA+GHEISHA) и двухкомпонентного массового состава (протон – ядро железа). В анализе использовалось несколько параметров, отвечающих за радиальное и продольное развития ШАЛ [14–18].

Значение $\langle \ln A \rangle$ в каждом случае находилось методом интерполяции [19]. Кривой на рис.3 и 4 показаны расчеты, выполненные в случае аномальной диффузии распространения космических лучей в Галактике. Из рис.3 и 4 видно, что массовый состав изменяется, достигая более тяжелого в области энергий $(2-5) \cdot 10^{17}$ эВ, и затем, начиная с энергии $\sim 3 \cdot 10^{18}$ эВ становится легче. Галактическая модель не дает такого резкого изменения массового состава в этой области энергий. Вероятнее всего, такое изменение массового состава космических лучей в области энергий $5 \cdot 10^{16} - 5 \cdot 10^{17}$ эВ связано с существованием границы перехода от галактических к метagalacticким космическим лучам. Такой вывод подтверждается расчетами из работы [20], где рассматривается сценарий галактического и метagalacticкого происхождения КЛ. Эти расчеты представлены на рис.5 вместе с нашими экспериментальными данными. Из

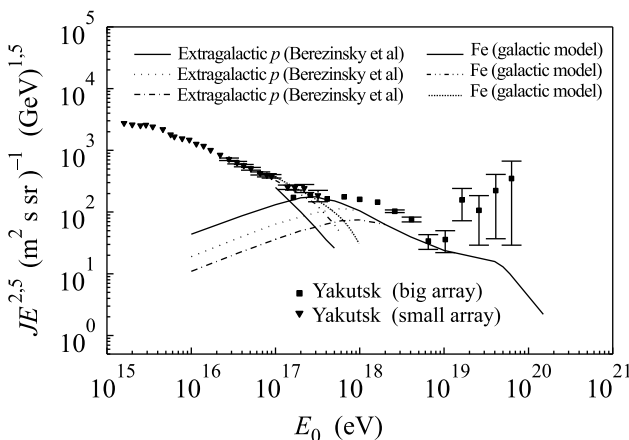


Рис.5. Сравнение экспериментального спектра с расчетным спектром из работы [20] для метagalacticких протонов ($E_0 > 5 \cdot 10^{17}$ эВ) и галактических ядер железа ($10^{15} - 5 \cdot 10^{17}$ эВ)

рис.5 видно, что в области энергий $5 \cdot 10^{16} - 5 \cdot 10^{17}$ эВ КЛ скорее всего галактического происхождения с заметной долей в общем потоке тяжелых ядер.

Нужно отметить, что в области после “колена” оценки массового состава КЛ, найденные на компактных установках, хорошо согласуются между собой. Этого нельзя сказать об области энергий $\sim 10^{18}$ эВ (см. рис.4), где данные установки HiRes указывают на более быстрое обогащение первичного излучения

легкими ядрами и протонами по отношению к данным, полученным на Якутской установке. Данные же Якутской установки, напротив, указывают на постепенное изменение массового состава от более тяжелого к легкому (протоны и ядра гелия) при энергии $\sim 10^{19}$ эВ. В обоих случаях данные указывают на существование тенденции “протонизации” первичного космического излучения выше $3 \cdot 10^{18}$ эВ.

4. Заключение. Прямые измерения (по энергии, рассеянной частицами ШАЛ в атмосфере) энергетического спектра КЛ сверхвысоких энергий подтвердили сложный вид формы спектра. Отмечается укрупнение спектра выше $\sim 3 \cdot 10^{15}$ эВ и уположение спектра выше $\sim 8 \cdot 10^{18}$ эВ. Характер зависимости величины $\langle \ln A \rangle$ от энергии, найденной по Якутским данным, указывает на изменение массового состава первичных частиц в особых точках энергетического спектра КЛ. После “колена” величина $\langle \ln A \rangle$ растет с энергией, достигая максимального значения $\langle \ln A \rangle = 3.5$ в интервале энергий $(2 - 5) \cdot 10^{17}$ эВ и далее начинает уменьшаться. Такая зависимость $\langle \ln A \rangle$ от энергии не противоречит гипотезе о распространении КЛ по законам аномальной диффузионной модели во фрактальной межзвездной среде (Лагутин и др., 2001). Выше 10^{18} эВ величина $\langle \ln A \rangle$ постепенно уменьшается, и при энергии $\sim 10^{19}$ эВ массовый состав практически представлен ядрами гелия и протонами. За порогом энергии $E_{\text{thr}} > 6 \cdot 10^{19}$ эВ интенсивность космических лучей резко падает, и этот эффект не описывается в рамках только галактической модели. Такой характер спектра не противоречит расчетам Березинского и др. [20] для метagalactic модели, в которой наблюдаемая в экспериментах по регистрации КЛ предельных энергий “лодыжка” может образовываться только протонной компонентой, приходящей из-за пределов нашей Галактики. Причем, детали формы экспериментального спектра, например “дип” (dip) – уменьшение интенсивности при энергии $\sim 10^{19}$ эВ, вероятнее всего, обусловлены взаимодействием внегалактических протонов с фотонами реликтового излучения ($p + \gamma_{\text{cmb}} \rightarrow p + e^+ + e^-$). В качестве прямого доказательства этой гипотезы можно использовать анизотропию, которая связана с происхождением и источниками космических лучей. По данным работ [21–23], выше энергий $E_0 \geq 8 \cdot 10^{18}$ эВ наблюдается слабая корреляция в направлениях прихода ШАЛ с плоскостью Галактики и сильная с плоскостью Сверхгалактики и что возможными источниками космических лучей могут быть квазары.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований

(проекты # 06-02-16973, # 05-08-50045) и МОН РФ (# НШ-7514.2006.2).

1. С. Н. Вернов, В. И. Соловьева, Б. А. Хренов и др., *Космические лучи и проблемы космофизики*, Новосибирск: СО АН СССР, 1964, с. 103–110.
2. М. Н. Дьяконов, Т. А. Егоров, А. А. Иванов и др., *Изв. АН СССР, сер. физ.* **42**, 1449 (1978).
3. G. Cunningham et al., *Ap. J.* **236**, L75 (1980).
4. Д. Д. Красильников, С. П. Кнуренко, В. А. Колосов и др., *Космические лучи с энергией выше 10^{17} эВ*, Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1983, с. 117–143; Д. Д. Красильников, М. Н. Дьяконов, Т. А. Егоров и др., *Изв. АН СССР, сер. физ.* **49**, 1321 (1985).
5. K. Greisen, *Phys. Rev. Lett.* **16**, 748 (1966); G. T. Zatsepin and V. A. Kuzmin, *JETP Lett.* **4**, 78 (1966).
6. S. P. Knurenko, V. A. Kolosov, Z. E. Petrov et al., *Proc. 27th ICRC (Hamburg)*, 2001, v. **1**, p. 145.
7. A. A. Ivanov, S. P. Knurenko, I. Ye. Sleptsov et al., *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* **122**, 226 (2003).
8. A. A. Lagutin, D. V. Strelnikov, A. G. Tyumentsev, *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* **97**, 267 (2001); A. A. Lagutin, V. V. Makarov, A. G. Tyumentsev, *Proc. 27th ICRC (Hamburg)*, 2001, **5**, p. 1896.
9. В. П. Артамонов, А. В. Глушков, А. А. Иванов и др., *Изв. РАН, сер. физ.* **58**, No.12, 92 (1994).
10. С. П. Кнуренко, В. А. Колосов, З. Е. Петров и др., *Наука и Образование No.4* с. 47 (1998).
11. М. Н. Дьяконов, Т. А. Егоров, Н. Н. Ефремов и др., *Космическое излучение предельно высокой энергии*, Новосибирск: Наука, 1991.
12. S. P. Knurenko, V. A. Kolosov, Z. E. Petrov et al., *Proc. 28th ICRC (Tsukuba)*, 2003, **3**, p. 329.
13. С. П. Кнуренко, А. А. Иванов, И. Е. Слепцов и др., *Письма в ЖЭТФ* **83**, 563 (2006).
14. М. Н. Дьяконов, А. А. Иванов, В. П. Егорова и др., *Письма в ЖЭТФ* **50**, 408 (1989).
15. С. П. Кнуренко, А. А. Иванов, И. Е. Слепцов, *Изв. РАН, сер. физ.* **58**, No.12, 92 (2005).
16. A. A. Ivanov, S. P. Knurenko, Z. E. Petrov et al., *Proc. 29th ICRC (Pune)*, 2005, **3**, p. 329; S. P. Knurenko, V. A. Kolosov, I. T. Makarov et al., *Int. Jour. of Mod. Phys. A (Proc. Suppl.)* **20**, 6900 (2005).
17. S. P. Knurenko, V. P. Egorova, A. A. Ivanov et al., *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* **151**, 92 (2006).
18. А. А. Иванов, С. П. Кнуренко, А. А. Лагутин и др., *Изв. РАН, сер. физ.* **71**, 467 (2007).
19. J. R. Horandel, *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* **29**, 2439 (2003).
20. V. S. Berezhinsky, S. I. Grigorieva, B. I. Hnatyk, arXiv:astro-ph/0403477 v.2, 2004; V. S. Berezhinsky, A. Gazizov, S. Grigorieva, arXiv:astro-ph/0410650 v.2, 2005.
21. J. Szabelsky et al., *J. Phys. G* **12**, 1433 (1986).
22. T. Stanev, P. L. Bierman, J. Loyd-Evans et al., *Phys. Rev. Lett.* **75**, 3056 (1995).
23. А. В. Глушков, *Изв. РАН, сер. физ.* **66**, 1599 (2002).