

УДК 537.591.15

ЗАВИСИМОСТЬ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОННО-ФОТОННОЙ КОМПОНЕНТЫ ОТ ЧИСЛА ЭЛЕКТРОНОВ В ШАЛ НА УРОВНЕ ТЯНЬ-ШАНЯ И ЯДЕРНЫЙ СОСТАВ ПКИ ПРИ ЭНЕРГИЯХ 1 – 50 ПэВ

Н. М. Нестерова, Н. М. Никольская, В. П. Павлюченко

Приводятся полученные на Тянь-Шаньской установке АДРОН экспериментальные данные о зависимости параметра "возраста" S в широких атмосферных ливнях космических лучей от числа электронов – величины, пропорциональной энергии первичных частиц E_0 . Параметр S определяет крутизну пространственного распределения электронно-фотонной компоненты и отражает продольное развитие каскада в атмосфере, что позволяет сделать вывод об изменении ядерного состава первичных частиц с ростом E_0 .

На Тянь-Шаньской комплексной установке АДРОН (690 г/см^2) [1] были получены экспериментальные данные о функциях пространственного распределения электронно-фотонной компоненты (ФПР_э) в широких атмосферных ливнях (ШАЛ) в нескольких интервалах по числу электронов N_e от $5.6 \cdot 10^5$ до $3.2 \cdot 10^7$. Величина N_e зависит от энергии частиц первичного космического излучения (ПКИ) E_0 в первом приближении как $N_e \approx E_0^{0.9}$. ФПР_э на уровне наблюдения отражает стадию продольного развития (возраст) каскада, которая зависит от массового числа ядра ПКИ и характеристик его взаимодействия с ядрами атомов воздуха, что используется в сочетании с характеристиками других компонент ШАЛ в ряде современных работ для оценки состава ПКИ.

Поперечные, как и продольные, распределения электронов ШАЛ принято аппроксимировать функциями Нишимуры – Каматы – Грейзена (NKG) с различными параметрами возраста S в зависимости от крутизны их спада с увеличением расстояния от оси ливня. В работе [2] было показано, что по экспериментальным данным поперечные ФПР, на разных уровнях наблюдения соответствуют меньшим S , чем расчетные продольные по NKG. Результаты дальнейших расчетов ФПР, приблизились к эксперименту [3]. Так что S по NKG используется нами как формальный параметр при сравнении с другими данными для описания ФПР электронно-фотонной компоненты ШАЛ на расстояниях до 120 м от оси, в пределах зенитных углов $0 - 30^\circ$ ($\approx 720 \text{ г/см}^2$) от вертикали.

Следует отметить, что при обработке данных эксперимента АДРОН определение S проводилось путем аппроксимации пространственных распределений, полученных по показаниям сцинтилляционных детекторов (СЦ) – $S_{сц}$ в каждом ливне. Здесь, в отличие от наших предыдущих данных, не исключался вклад фотонов, регистрируемых СЦ. Если учесть этот вклад, то $S = S_{сц} + (0.15 \pm 0.03)$. Основные параметры ШАЛ: X , Y – положение оси, зенитный и азимутальный углы, S и N_e были определены по программе "Space" [4].

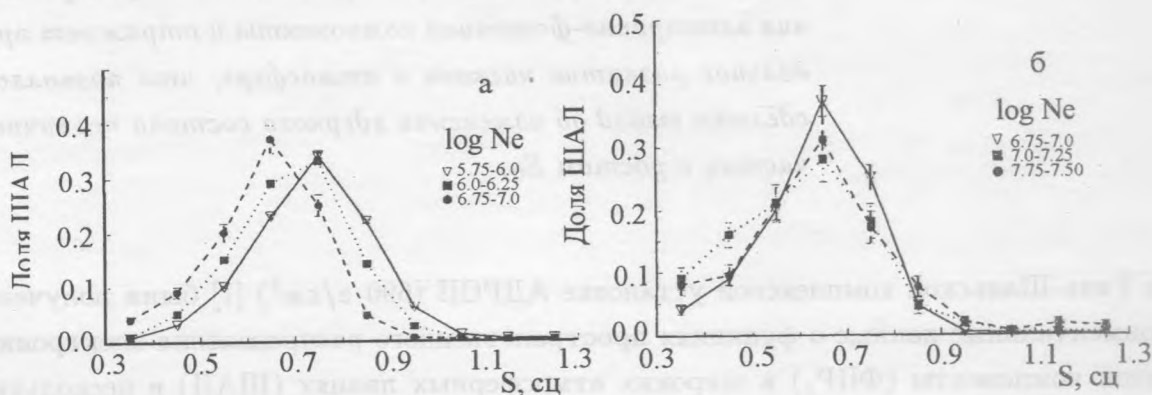


Рис. 1. Распределения по параметру "возраста" $S_{сц}$ ШАЛ в пяти интервалах по числу электронов N_e на уровне 720 г/см^2 .

Распределения по $S_{сц}$ для ШАЛ получены в пяти интервалах по N_e . На рис. 1а $N_e = (5.6 - 10.0) \cdot 10^5$, $N_e = (10.1 - 17.8) \cdot 10^5$, $N_e = (56 - 100) \cdot 10^5$, а на рис. 1б – $N_e = (56 - 100) \cdot 10^5$ (повторение рис. 1а для сравнения), $N_e = (100 - 178) \cdot 10^5$, $N_e = (178 - 316) \cdot 10^5$ (ошибки на рис. 1 – статистические).

Как видно из рисунков, с увеличением N_e от $5.6 \cdot 10^5$ до $1.8 \cdot 10^7$ происходит постоянное увеличение доли ШАЛ с малыми S ("молодых" ШАЛ). Так, вклад ШАЛ с $S_{сч} < 0.6$ (или $S < 0.75$) возрастает от 15% до 45%, тогда как вклад ШАЛ с $S_{сч} > 0.8$ ($S > 0.95$) падает с 29% до 5% в этом диапазоне N_e . Доля "старых" ШАЛ с $S > 1.2$ очень мала. Недостаточная статистическая точность в обработанном массиве данных для интервала $N_e = (1.8 - 3.2) \cdot 10^7$ не позволяет сделать вывод о сохранении или прекращении этой тенденции.

Однако, обработка ШАЛ сверхвысоких энергий [5] с $N_e > 3 \cdot 10^8$ по другим алгоритмам показала, что около 100% таких ливней имеют $S_{сч} < 0.6$. Из-за малой статистики ШАЛ в [5] (в отличие от данной работы) рассматривались в области больших зенитных углов и расстояний от центра установки.

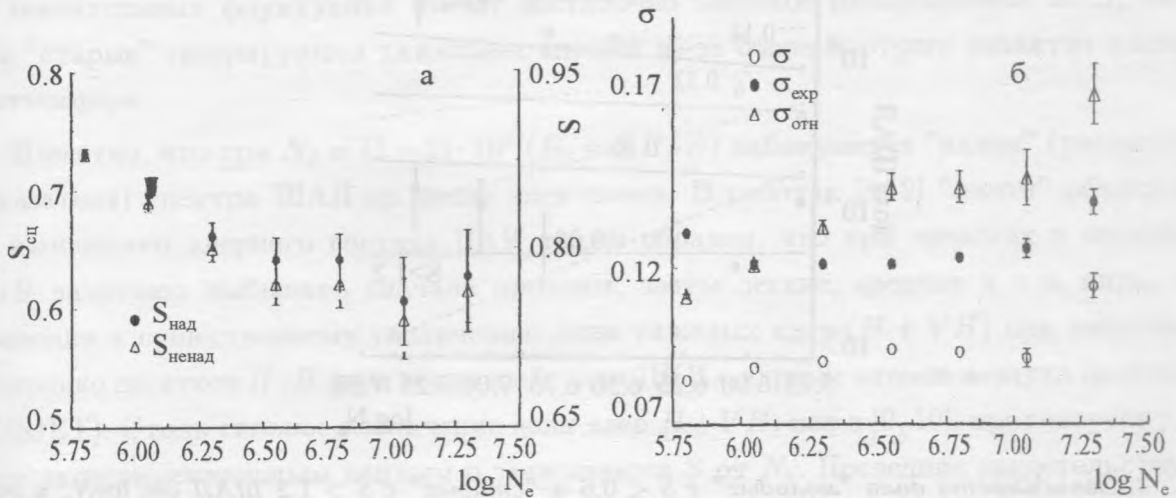


Рис. 2. а) Зависимость средних величин S : $S_{сч}$ и S от $\log N_e$ для ШАЛ с надежно определенным S (точки) и менее надежно (треугольники). б) Значения среднего квадратического отклонения распределений по $S_{сч}$ от $\log N_e$: абсолютные значения без поправок на ошибки эксперимента (черные кружки) и с поправками (белые кружки); относительные значения с поправками (треугольники).

На рис. 2а представлена зависимость от N_e среднего значения S : $S_{сч}$ (левая шкала) и S (правая шкала). Точки на этом рисунке соответствуют ШАЛ с надежно определенными параметрами, треугольники – с менее надежными; число последних увеличивается с ростом N_e , но не превышает 10%. Как видно из рис. 2а, с ростом N_e среднее значение S систематически уменьшается, но при $N_e > 3.2 \cdot 10^6$ это изменение несколько замедляется.

Заметим, что соответствующее уменьшение S наблюдалось на старой Тянь-Шаньской установке в ШАЛ с $N_e \geq 1.3 \cdot 10^5$ [6].

На рис. 26 дана зависимость средней ширины распределений по $S_{сч}$ от $N_e: \sigma_s$. Черные точки – экспериментальные данные о $\sigma_{s\text{эксн}}$, белые – те же данные за вычетом ошибок измерения S : $\sigma_s = \sqrt{\sigma_{s\text{эксн}}^2 - \sigma_{s\text{ошиб}}^2}$, треугольники – относительная ширина – σ_s/S . Рис. 26 показывает, что относительная ширина распределений несколько увеличивается с ростом N_e в основном за счет роста доли "молодых" ШАЛ.

Надо отметить, что результаты разных серий измерений на Тянь-Шаньской установке АДРОН, обработанные по другим алгоритмам с аппроксимациями по NKG (Q100 Шаулов [7] и Nelder-Mid Чубенко), дали близкие значения $\sigma_{s\text{эксн}}$, хотя по алгоритму Q100 распределения при $S_{сч} = 0.5 - 1.0$ смещены на +0.05.

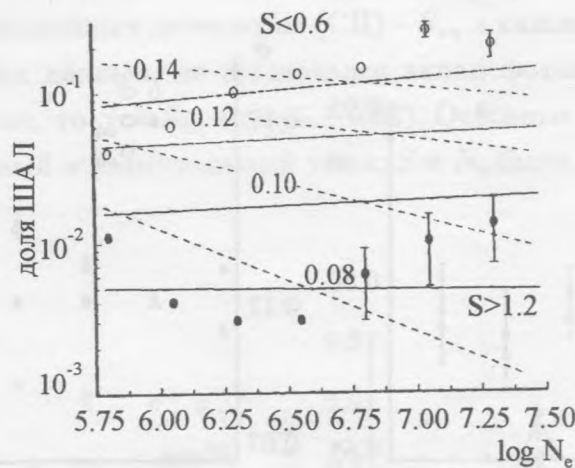


Рис. 3. Зависимости доли "молодых" с $S < 0.6$ и "старых" с $S > 1.2$ ШАЛ от $\log N_e$ и экспериментальных ошибок (указаны возле каждой кривой). Кривые – из расчетов [8], точки – данные эксперимент ($S < 0.6$ – сплошные кривые и белые кружки, $S > 1.2$ – пунктир и черные кружки).

На рис. 3 на график из расчетной работы [8] нанесены наши экспериментальные результаты. На графике, как и в [8], показан набор кривых зависимости доли ШАЛ от N_e на уровне Тянь-Шаня с малыми и большими S . Различные кривые соответствуют разным значениям экспериментальных ошибок в S . Эти значения указаны возле каждой кривой: сплошные кривые для $S < 0.6$, пунктирные – для $S > 1.2$. Расчетные данные получены по модели QGSJET и диффузионной модели распространения ПКИ в Галактике. Ядерный состав ПКИ изменялся согласно [9] от достаточно "легкого" (60% P и

20% $H + VH$) при энергии ПКИ несколько $ПэВ$ до "тяжелого" (40% P и 40% $H + VH$) при десятках $ПэВ$.

На рис. 3 белые кружки соответствуют экспериментальным ШАЛ с $S < 0.6$, черные – $S > 1.2$. По нашим оценкам экспериментальные ошибки составляют 0.11 при $N_e = 5 \cdot 10^5$ и несколько уменьшаются с ростом N_e .

Как видно из рис. 3, ШАЛ с $S > 1.2$ составляют не более 1% от полного числа и изменение их доли с N_e находится в пределах ошибок эксперимента. Доля "молодых" ШАЛ растет с ростом N_e , причем этот рост существенно превышает возможные ошибки измерения. Из-за разных продольных распределений электронно-фотонной компоненты ШАЛ в атмосфере от легких и тяжелых ядер должны различаться их поперечные распределения при стандартных предположениях о характере взаимодействия ПКИ. Причем, "молодые" ШАЛ генерируются в основном первичными протонами, хотя из-за значительных флуктуаций имеют достаточно широкое распределение по S , тогда как "старые" генерируются тяжелыми ядрами из-за более быстрого развития каскада в атмосфере.

Известно, что при $N_e = (1 - 2) \cdot 10^6$ ($E_0 \approx 3 ПэВ$) наблюдается "излом" (увеличение показателя) спектра ШАЛ по числу электронов. В работах [8, 9] "излом" объясняется изменением ядерного состава ПКИ таким образом, что при энергиях в несколько $ПэВ$ начинают выбывать сначала протоны, затем легкие, средние и т.д. ядра, что приводит к существенному увеличению доли тяжелых ядер ($H + VH$) при энергиях в несколько десятков $ПэВ$ (при взаимодействии ПКИ с ядрами атомов воздуха по модели QGSJET). Столь сильное увеличение доли ядер $H + VH$, как в [9, 10], противоречит нашим экспериментальным данным о зависимости S от N_e . Последние свидетельствуют о систематическом росте крутизны средней функции пространственного распределения электронно-фотонной компоненты ШАЛ (уменьшении S) при изменении N_e от $5 \cdot 10^5$ до $2 \cdot 10^7$ ($E_0 \approx 1.0 - 50 ПэВ$), и скорее указывают на увеличение доли легких ядер, в основном протонов, в области энергий за "изломом".

Надо отметить, что до "излома" (при $N_e = 5 \cdot 10^5$), где в расчетах [8] предполагается достаточно легкий состав ПКИ, наши экспериментальные данные хорошо совпадают с QGSJET, что еще раз подтверждает наши выводы об отсутствии увеличения доли тяжелых ядер с ростом энергии ПКИ.

Однако, более основательные выводы можно делать при анализе результатов измерений нескольких компонент ШАЛ на основе расчетов с экстраполяцией измеренных на ускорителях характеристик ядерных взаимодействий и с учетом ядерного состава

ПКИ.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 98-02-16942.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Adamov D. S., Afanasiev B. N., Arabkin V. V., et al. Proc. 20th ICRC, Moscow, **5**, 460 (1987).
- [2] Danilova T. V., Kabanova N. V., Nesterova N. M., Stamenov J. N., et al. Proc. 15th ICRC, Plovdiv, **8**, 129 (1977).
- [3] Гончаров А. И., Конопелько А. К., Пляшешников А. В. и др. Известия АН СССР, сер. физ., **53**, 329 (1989).
- [4] Асейкин В. С., Никольская Н. М., Павлюченко В. П. Препринт ФИАН N 31, М., 1987.
- [5] Nesterova N. M., Chubenko A. P., Djatlov P. A., et al. Proc. 24th ICRC, Roma, **2**, 748 (1995).
- [6] Никольский С. И., Ромахин В. А. Ядерная физика, в печати (2000).
- [7] Adamov D. S., Arabkin V. V., Bessharov S. P., et al. Proc. 24th ICRC Invited, Rapporteur, Highlight papers, Il Nuovo Cimento, **19**, 999 (1996).
- [8] Kalmykov N. N., Christiansen G. B., Ostapchenko S. S., et al. Proc. 25th ICRC, Durban, **6**, 277 (1997).
- [9] Swordy S. Proc. 23rd ICRC Invited, Rapporteur, Highlight papers, 243 (1994); Proc. 24th ICRC, Roma, **2**, 697 (1995).
- [10] Fomin Yu., Kalmykov N. N., Christiansen G. B., et al. Proc. 25th ICRC, Durban, **4**, 17 (1997).

Поступила в редакцию 29 марта 2000 г.