

УДК 537.591.15

ЯДЕРНЫЙ СОСТАВ ПКИ ПРИ ЭНЕРГИЯХ 1 – 10 ПэВ, ОПРЕДЕЛЕННЫЙ ПО ПРОСТРАНСТВЕННЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ ЭЛЕКТРОННО-ФОТОННОЙ КОМПОНЕНТЫ ШАЛ, СОПРОВОЖДАЮЩИХ ВЫСОКОЭНЕРГИЧНЫЕ ГАММА-КВАНТЫ В РЭК НА УРОВНЕ ТЯНЬ-ШАНЯ

Н. М. Нестерова, С. Б. Шаулов

Приводятся данные Тянь-Шаньской установки "Адрон" об изменении пространственных распределений электронно-фотонной компоненты ШАЛ (параметра "возраста" S) в широких атмосферных ливнях космических лучей, сопровождающих высокоэнергичные гамма-кванты и адроны в рентгеномульсионных камерах, в зависимости от числа электронов N_e – величины, характеризующей энергию первичного ядра E_0 . Такие события генерируются преимущественно протонами и позволяют судить об их роли в ПКИ при различных E_0 . Результаты показывают, что в области энергий ПКИ за "изломом" спектра ШАЛ по N_e при $N_e > 10^6$ доля легких ядер не уменьшается до 10^7 , либо увеличивается доля частиц, проникающих в глубь атмосферы.

Одной из основных проблем космических лучей в диапазоне первичных энергий 0.1 – 100 ПэВ является выяснение причин изменения вида спектров различных компонент широких атмосферных ливней (ШАЛ), т.н. "излом" спектров (изменение показателя при аппроксимации степенным законом), в первую очередь, "излом" спектра ШАЛ по числу электронов, зарегистрированный многими установками [1 – 5] и др. (см. [6]). Он наблюдается при пересчете к энергии первичного космического излучения (ПКИ) по стандартным моделям в области $E_0 = 3 – 5$ ПэВ. В ряде работ, например, в [7, 8] и

др. "излом" объясняется изменением ядерного состава. Представленность различных ядер ПКИ согласно диффузионной модели изменяется таким образом, что при энергиях в несколько $PэВ$ начинают выбывать из его состава сначала протоны, а затем по мере увеличения энергии (в соответствии с магнитной жесткостью) и другие ядра. Это должно приводить к значительному увеличению доли тяжелых ядер при энергиях более 10 $PэВ$. Анализ экспериментальных данных по ШАЛ, зарегистрированных разными установками, с целью определить как изменяется ядерный состав ПКИ после "излома" пока не дал определенного результата. Другое объяснение изменения спектра предполагает дополнительный вклад в ПКИ от близкого космического источника [6]. В работе [9] наличие "излома" объясняется не изменением состава ПКИ, а изменением характера его взаимодействия с ядрами атомов воздуха.

На комплексной установке "Адрон", расположенной на Тянь-Шане (690 г/см^2) [2, 3], получены экспериментальные данные о зарегистрированных в рентгеноэмульсионных камерах (РЭК) высокоэнергичных гамма-квантах и ядрах в ШАЛ от ПКИ с энергией E_0 до 20 $PэВ$ [10], которые при этих энергиях согласно модельным расчетам [11, 12] эффективно генерируются преимущественно протонами и легкими ядрами.

Для событий в РЭК были определены энергия и координаты, после чего они по показаниям ионизационных камер, прослоенных РЭК, были сопоставлены с определенными ШАЛ [13].

Полное число электронов N_e в ШАЛ, по которому была проведенная классификация событий, примерно пропорционально $E_0^{0.9}$, что позволяет судить об изменениях процессов с ростом энергии ПКИ E_0 . Пространственные распределения электронно-фотонной компоненты (ФПРэ) в ШАЛ отражают продольное развитие каскада в атмосфере, которое зависит от заряда ядра ПКИ и характеристик его взаимодействия с ядрами атомов воздуха. 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 взаимодействии).

Как продольные, так и поперечные распределения принято характеризовать параметром каскадной теории S . Причем, "молодые" ШАЛ с малыми S генерируются в основном первичными протонами, хотя последние из-за значительных флуктуаций должны иметь достаточно широкое распределение по S , тогда как "старые" с большими S генерируются тяжелыми ядрами из-за более быстрого развития каскада в атмосфере.

Параметры электронно-фотонной компоненты (X, Y – координаты оси, зенитный и азимутальный углы ее наклона, N_e, S) определялись по показаниям сцинтилляцион-

ных детекторов (СЦ). При основной обработке данных они были найдены по программе "Space" [14], где значения S ограничивались: для ШАЛ с $S < 0.35$ принималось $S = 0.35$. Затем при анализе материала с событиями в РЭК были также использованы алгоритмы определения параметров ШАЛ по программе "Q100" [15] без ограничения по S . Пространственные распределения электронов ШАЛ аппроксимировались функциями Нишимуры–Каматы–Грейзена (NKG) с различными параметрами "возраста" S в зависимости от их крутизны на расстояниях до 120 м от оси в пределах зенитных углов $0 - 30^\circ$, где реальные средние ФПРэ хорошо совпадают с NKG. Современные расчеты отличаются от NKG, поэтому значение S по NKG применялось нами как формальный параметр для сравнения с другими данными, использующими его. Надо отметить, что значение S при обработке данных эксперимента "Адрон" определялось путем аппроксимации ФПРэ, полученных по показаниям СЦ – $S_{сч}$ в каждом ливне. Здесь, в отличие от прежних данных Тянь-Шаньской установки [2, 9], при определении S не исключался вклад фотонов, регистрируемых СЦ. Если учесть этот вклад, то $S_{сч} < S$ и $S = S_{сч} + (0.15 \pm 0.03)$ по "Space" или $S \approx S_{сч} \pm 0.1$ по "Q100". Эта поправка учитывалась затем при определении N_e .

Распределения по S ($S_{сч}$) были получены в разных интервалах по N_e как для событий с гамма-квантами и адронами в РЭК, так и для всех ШАЛ по программам "Space" и "Q100", которые дали близкие распределения по $S_{сч}$, но по "Q100" с несколько большими "хвостами" и при $S_{сч} = 0.5 - 0.8$ смещенные примерно на $+0.05$. На рис. 1 представлены распределения по $S_{сч}$ для интервалов по N_e : $(5.6 - 10.0) \cdot 10^5$, $(18 - 32) \cdot 10^5$, $(56 - 100) \cdot 10^5$ для ШАЛ, сопровождающих гамма-кванты и адроны в РЭК с суммарной энергией семейств адронов $\sum E_h > 4 \text{ ТэВ}$, и гамма-квантов $\sum E_g > 10 \text{ ТэВ}$ когда энергии отдельных частиц E_h и $E_g > 2 \text{ ТэВ}$ при числе частиц в семействе $n > 1$ (толстые линии). Для сравнения аналогичные распределения представлены и для всех ШАЛ (тонкие линии). Данные получены при обработке ШАЛ по программе "Q100" (ошибки на рис. 1 – статистические).

Как видно из этого рисунка, с увеличением N_e от $5.6 \cdot 10^5$ до $5.6 \cdot 10^6$ происходит постоянное увеличение доли ШАЛ с малыми S ("молодых" ШАЛ), при этом максимум распределений смещается примерно на -0.1 . Аналогичные распределения, полученные по программе "Space" при отборе ШАЛ, сопровождающих более высокоэнергичные гамма-кванты с $\sum E_g > 16 \text{ ТэВ}$ и $E_g > 4 \text{ ТэВ}$ при $n > 1$, дали аналогичные результаты, где эта тенденция выражена более ярко.

На рис. 2а представлена зависимость от N_e доли "молодых" ШАЛ с $S_{сч} < 0.5$

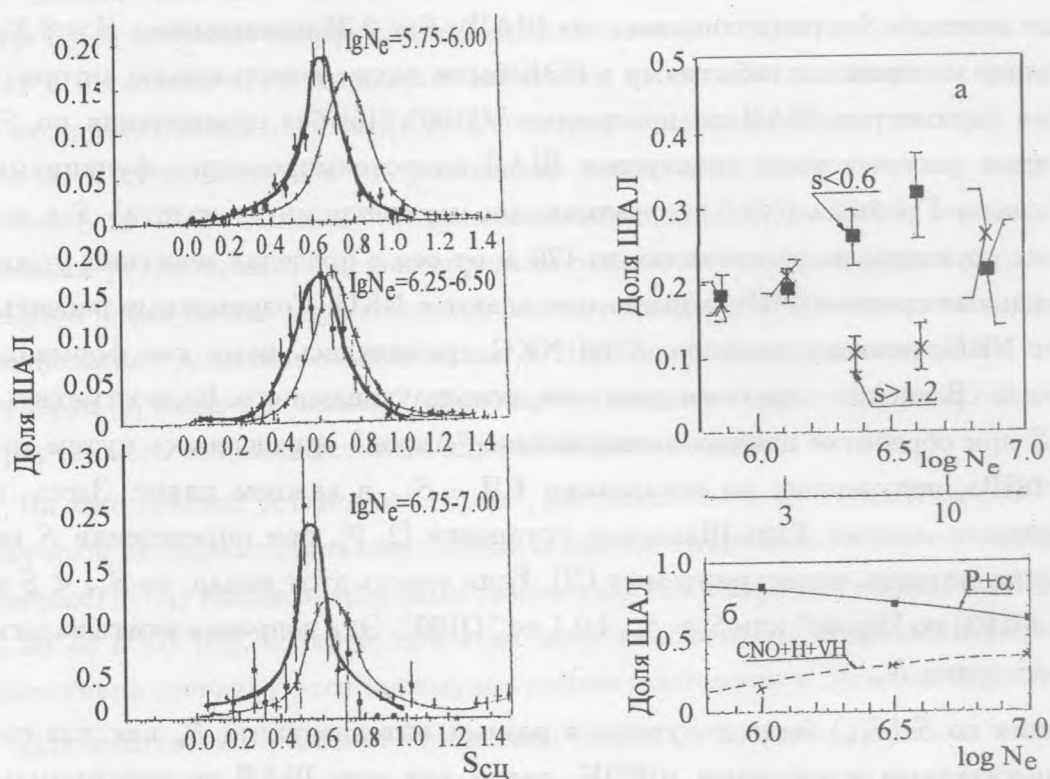


Рис. 1. Распределения по параметру $S_{сч}$ для разных интервалов по N_e (по алгоритму Q100). Толстые линии (квадраты) – для ШАЛ с гамма-квантами и адронами, тонкие (кресты) – для всех ШАЛ. Значения $\log N_e$ указаны возле каждого отдельного рисунка.

Рис. 2. Зависимость от N_e доли ШАЛ с гамма-квантами и адронами от полного числа таких ШАЛ. а) Эксперимент – ШАЛ с $S < 0.6$ ($S_{сч} < 0.5$) – черные квадраты, $S > 0.85$ ($S_{сч} > 0.75$) – косые кресты (по алгоритму Q100). б) Расчет по MQ1 ШАЛ от ядер ПКИ $P + \alpha$ – сплошная кривая, $CNO+H+VH$ – пунктирная кривая.

($S < 0.60$) и несколько более "старых" с $S_{сч} > 0.75$ ($S > 0.85$) в событиях ШАЛ с семействами в РЭК, распределения которых представлены на рис. 1. Данные рис. 2а имеют по программе "Sрасе" качественно такие же закономерности. Как видно из рис. 2а, в диапазоне $N_e = (1.0 - 5.6) \cdot 10^6$ ($E_0 = 2 - 10$ ПэВ) доля "молодых" ШАЛ растет с ростом N_e (E_0), тогда как доля более "старых" уменьшается. При $N_e > 5.6 \cdot 10^6$ намечается окончание этого роста, но здесь для определенного вывода мала статистика событий. Кроме того, по расчетам в этой области уже становится заметным вклад более тяжелых ядер ПКИ при образовании высокоэнергичных гамма-квантов и адронов в

ШАЛ.

В работе [16] был проведен аналогичный анализ для всех ШАЛ и сделан такой же вывод. Таким образом, экспериментальные данные о ШАЛ, сопровождаемых высокоэнергичными гамма-квантами и адронами, так же как данные о всех ШАЛ, свидетельствуют о систематическом росте крутизны (уменьшении S) функции пространственного распределения электронно-фотонной компоненты ШАЛ при изменении N_e от 10^6 до $5.6 \cdot 10^6$. Если считать, что с увеличением энергии ПКИ характер взаимодействия не изменяется и соответствует современным моделям, основанным на экстраполяции данных ускорителей в область энергий ШАЛ, то можно ожидать некоторого "омоложения" ШАЛ в связи со смещением максимума развития ШАЛ в глубь атмосферы при неизменном составе ПКИ, обогащение же его тяжелыми ядрами ведет к обратному процессу.

В нашей работе [15] экспериментальное отношение доли "молодых" событий с $S < 0.6$ во всех ШАЛ к доле событий со средними $S = 0.6 - 0.8$ сравнивается с расчетами по модели QGSJET и диффузионной модели [16], где учтено смещение с E_0 максимума ШАЛ в атмосфере. Результат сравнения указывает на существенное противоречие с предположением, что ядерный состав в диапазоне $N_e = (1-5) \cdot 10^6$ (до энергий ~ 10 ПэВ) может обогащаться тяжелыми ядрами.

Как уже упоминалось, по расчетам эффективность генерации ШАЛ, сопровождаемых высокоэнергичными гамма-квантами и адронами, при этих N_e значительно выше для первичных протонов и легких ядер, чем для более тяжелых. Поэтому наши данные о пространственных распределениях электронно-фотонной компоненты в этих ШАЛ подтверждают, что в области энергий ПКИ за "изломом" спектра ШАЛ по числу электронов на уровне Тянь-Шаня, доля легких ядер не уменьшается и, возможно, растет; либо увеличивается доля частиц, проникающих в глубь атмосферы.

Такой же вывод был сделан нами в работе [18] при сравнении спектров по N_e для ШАЛ, сопровождаемых высокоэнергичными гамма-квантами, с расчетами по модели MQ1.

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

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Fomin Yu. A., Christiansen G. B., Kulikov G. V. et al. Proc. 22nd ICRC, Dublin, 2, 85 (1991).

- [2] Adamov D. S., Afanasiev B. N., Arabkin V. V. et al. Proc. 20th ICRC, Moscow, **5**, 460 (1987).
- [3] Nesterova N. M., Chubenko A. P., Djatlov P. A. et al. Proc. 24th ICRC, Roma, **2**, 748 (1995).
- [4] Nagano M., Teskima M., Matsubara Y. et al. Proc. 22nd ICRC, **2**, 89.
- [5] EAS-TOP coll., Proc. 24th ICRC, Roma, **2**, 732 (1995).
- [6] Erlykin A. D., Wolfendale A. W. J. Phys. G, Nucl. Part, **23**, 979 (1997).
- [7] Swordy S. Proc. 23rd ICRC, 1996, Invited, Rapporteur, Highlight papers, 243, Proc. 24th ICRC, Roma, **2**, 697.
- [8] Fomin Yu. A., Kalmykov N. N., Christiansen G. B. et al. Proc. 25th ICRC, Durban, **4**, 17 (1997).
- [9] Никольский С. И., Ромахин В. А. Ядерная физика, 11 (2000), в печати.
- [10] Adamov D. S., Arabkin V. V., Barkalov K. V. et al. Proc. 20th ICRC, Moscow, **6**, 144 (1987).
- [11] Dunaevsky A. M. et al. ICR on UHE CRI, API 1995, Conf. Proc. 276, 136.
- [12] Крутикова Н. П., Шаулов С. Б. Препринт ФИАН N 7, М., 1998.
- [13] Shaulov S. B. Preprint FIAN N 31, Moscow, 1987.
- [14] Асейкин В. С., Никольская Н. М., Павлюченко В. П. Препринт ФИАН N 31, М., 1987.
- [15] Adamov D. S., Arabkin V. V., Bessharov S. P. et al. Proc. 24th ICR, Roma, 1996, Invited, Rapporteur, Highlight papers, II Nuovo Cimento, 19, 999.
- [16] Нестерова Н. М., Никольская Н. М., Павлюченко В. П. Краткие сообщения по физике ФИАН, N 6, 17 ().
- [17] Kalmykov N. N., Christiansen G. B., Ostapchenko S. S. et al. Proc. 25th ICRC, Durban, **6**, 277 (1997).
- [18] Arabkin V. V., Barkalov K. V., Вильданов Н. Г. и др. Известия РАН, сер. физ., **63**, N 3, 517 (1999).

Поступила в редакцию 8 декабря 2000 г.