

УДК 537.591.15

ВОЗМОЖНЫЙ ИЗБЫТОК ШАЛ С $N_e \sim 2 \cdot 10^6$, ПАДАЮЩИХ ПОД БОЛЬШИМИ ЗЕНИТНЫМИ УГЛАМИ, И ПРОБЛЕМА ОБЪЯСНЕНИЯ ИЗЛОМА В ПЕРВИЧНОМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ СПЕКТРЕ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

Л.Г. Деденко, В.И. Яковлев¹

Проанализирована интенсивность широких атмосферных ливней с фиксированным числом частиц в зависимости от зенитного угла в атмосфере. Получен избыток ливней с числом частиц $N_e = (2,5 - 4) \cdot 10^6$, регистрируемых под зенитными углами $\theta > 50^\circ$ Тянь-Шаньской установкой для исследования широких атмосферных ливней.

В настоящей работе проанализирована интенсивность широких атмосферных ливней (ШАЛ) с фиксированным числом частиц в зависимости от зенитного угла в атмосфере.

Был использован банк данных ШАЛ [1], полученных на Тянь-Шаньской комплексной установке ШАЛ [2]. Исследовались ливни, попавшие в квадрат со стороной 15 метров, центр которого совмещен с центром установки. Параметры ливней банка данных: неискаженная порогом регистрации величина ливня $N_e > 1,3 \cdot 10^5$ частиц; возраст ливня $0,4 < S < 1,8$; точность определения угла прихода ливня θ изменяется от $\delta\theta \approx 5^\circ$ при $\theta = 0 - 5^\circ$, до $\delta\theta \cong 8^\circ$ при $\theta \gtrsim 60^\circ$; координаты осей ливней, отсчитываемые от центра установки, $|x, y| < 7,5$ м.

Рассматривались интегральные угловые интенсивности для двух групп ливней с числом частиц в интервалах $N_e = (1,6 - 2,5) \cdot 10^5$ и $N_e = (2,5 - 4,0) \cdot 10^6$ частиц. Результаты представлены на рис. 1. Как видно из рисунка, полученные распределения не описываются одной общей экспонентой.

¹Физический факультет МГУ.

Чтобы понять, как должно изменяться в атмосфере количество ливней с заданным числом частиц, было выполнено моделирование.

Расчет интегральной интенсивности ливней как функции зенитного угла выполнен в два этапа. Сначала, в рамках модели кварк-глюонных струн (КГС) [3], рассчитывалась зависимость средних чисел электронов и мюонов с энергией выше 0,3 ГэВ (с учетом "равновесных" электронов сопровождения) от энергии первичных протонов в интервале $10^{13} - 10^{17}$ эВ для значений косинуса зенитных углов от 1 до 0,4 с шагом 0,1. Затем, предполагая, что спектр первичных частиц имеет излом при энергии $E = 3 \cdot 10^{15}$ эВ с показателями $\gamma_1 = 1,66$ до излома и $\gamma_2 = 2,1$ - после него, нормальный состав первичного космического излучения (ПКИ) [4] и справедливость гипотезы суперпозиции [5], была рассчитана зависимость интенсивности ливней от зенитного угла:

$$n(\theta_i) = (2\pi I_0)^{-1} I_0 \sum_A H_A 2\pi \int_{\theta_i}^{\pi/2} \sin \theta d\theta \int_{Y_{\min}(\theta, A)}^{Y_{\max}(\theta, A)} e^{-\gamma Y} dY,$$

где H_A - доля ядер с атомным весом A в ПКИ; $I_0 = \text{const}$; $y = \ln(E/3,16 \cdot 10^6 \text{ ГэВ})$ - логарифм энергии протонов; Y_{\min} и Y_{\max} - пороговые энергии протонов, генерирующих ливни с числом частиц в соответствующем интервале N .

Как видно, расчет резко расходится с экспериментальными данными: налицо существенный избыток ливней, регистрируемых под большими углами.

Обычно генерацию ливней, регистрируемых под углами $\theta \geq 70^\circ$, связывают с мюонами высоких энергий [12]. В настоящей работе, во-первых, анализируются ливни с углами $\theta > 60^\circ$, а во-вторых, не исключена возможность генерации горизонтальных ливней тяжелыми проникающими частицами [12].

В связи с достаточно плохим угловым разрешением установки можно было бы предположить уширение углового распределения и появление за счет этого избыточных ливней под большими углами. Однако благодаря специфической геометрии ландшафта, окружающего установку, мы можем быть уверенными, что избыточные ливни действительно приходят под большими зенитными углами. Дело в том, что установка окружена близко расположенными горами таким образом, что имеется сравнительно узкий интервал азимутальных направлений от 115° до 220° , не экранируемых ими. В этом интервале азимутальных направлений и регистрируется 60% ливней, имеющих зенитный угол $\theta > 50^\circ$. Кроме того, среднее число мюонов в ливнях с $\theta > 50^\circ$ в 1,78 раза превосходит число мюонов в ливнях с тем же числом частиц, но регистрируемых

под углами $\theta < 30^\circ$. Это также свидетельствует о большей глубине регистрации ливней при этих углах, т.е. о правильном, в среднем, измерении зенитного угла.

Если экстраполировать "хвост" полученных распределений в область $\theta = 0^\circ$ (в точку $x = 680$ г/см²), то можно видеть, что доля избыточных ливней в полном потоке практически не зависит от N_e , однако при увеличении N_e резко замедляется уменьшение их числа с возрастанием зенитного угла, что может свидетельствовать о возможном вкладе нестабильной компоненты.

В этой связи отметим, что изучение поглощения потока энергии, выделенной адронами ствола ШАЛ, показало, что при энергиях выше 10 ТэВ результаты могут быть поняты только в предположении о генерации в калориметре нестабильных частиц со свойствами, близкими к свойствам очарованных частиц [6]. Эта, проникающая, по сравнению с обычными адронами (нуклоны, пионы), компонента получила название "длиннопробежная компонента" [7]. Вывод о наличии в адронной составляющей длиннопробежной компоненты был подтвержден в специальном эксперименте, выполненном с помощью рентген-эмульсионной камеры с толстым свинцовым поглотителем в рамках эксперимента "ПАМИР" [8]. Здесь был зарегистрирован избыток каскадов, начинающихся на глубинах свыше 80 каскадных единиц.

Возможно, что избыток регистрируемых ливней также связан с генерацией очарованных частиц (примерно в 30 % взаимодействий протонов). Как показано в работе Борескова и Кайдалова [9], в случае ассоциативной генерации Λ_c -бариона и \bar{D} -мезона они уносят подавляющую долю энергии, а малый коэффициент неупругости очарованных частиц [10] обеспечивает сохранение их импульса вплоть до распада, поэтому роль таких частиц в развитии ШАЛ на больших глубинах в атмосфере должна увеличиваться с ростом энергии первичных частиц.

В случае, если очарованные частицы действительно играют большую роль в развитии каскадов высоких энергий, возможно, что они играют заметную роль и в формировании излома в спектре ливней по числу частиц. Этот излом имеет две существенные особенности: 1) величина излома велика ($\Delta\gamma \approx 0.3 - 0.5$) и 2) излом всегда располагается при $N_e \approx 10^6$ частиц, независимо от уровня наблюдения (кроме самого первого эксперимента, выполненного на Чакалтайе).

Последняя особенность до сих пор была выявлена в экспериментах, выполненных на разных установках [11], что могло ставить под сомнение данный результат. Поэтому были получены спектры ливней по числу частиц при разных зенитных углах, используя упомянутый банк данных Тянь-Шаньского комплекса ШАЛ. Эти результаты приведены

на рис. 2. Видно, что и в случае использования одной установки спектры ливней по числу частиц, измеренные под разными углами, имеют излом при $N_e \approx 10^6$ частиц.

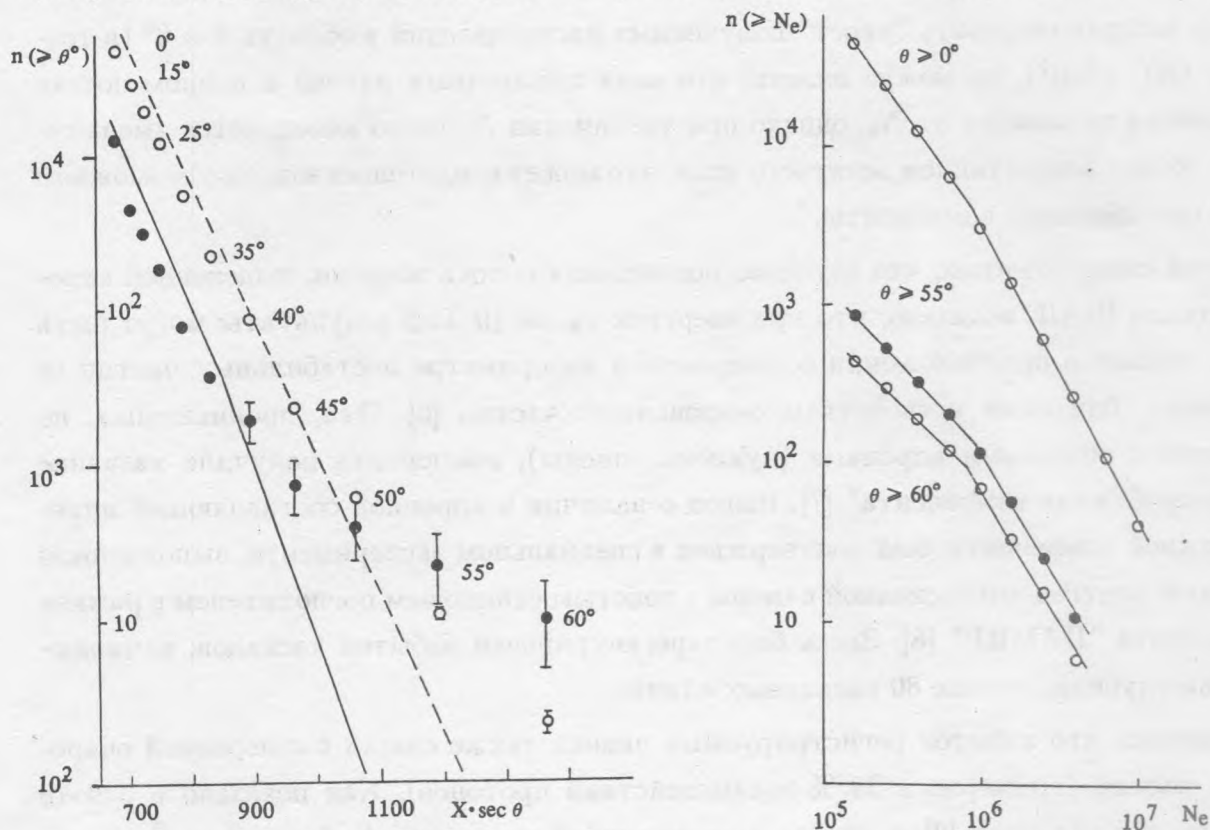


Рис. 1. Интенсивность ШАЛ с фиксированным числом частиц $N_e = (1.6 - 2.5) \cdot 10^5$ (о, левая шкала); $N_e = (2.5 - 4.0) \cdot 10^6$ (•, правая шкала) на разных глубинах.

Рис. 2. Спектры ливней по числу частиц, измеренные под разными углами на Тянь-Шаньской станции ($x \geq 681 \text{ г/см}^2$).

Поскольку ливням с одним и тем же числом частиц N_e , зарегистрированным на разных глубинах в атмосфере, соответствуют в среднем разные значения первичной энергии, вывод о связи излома в спектре ливней по числу частиц только с "изломом" в энергетическом спектре ПКИ представляется неоднозначным.

В свете приведенных выше результатов необходимо выполнить эксперименты по регистрации энергетического спектра ПКИ в области энергий $3 \cdot 10^{14} - 3 \cdot 10^{16}$ эВ путем регистрации наклонных ($\theta > 50^\circ$) ливней установкой, использующей черенковское излучение, которое контролирует свыше 60% энергии первичных частиц. Ясно, что эта установка должна обладать гораздо лучшим угловым разрешением, чем использованная в настоящей работе.

Очевидно необходимы также расчеты, учитывающие возможную возрастающую роль генерации очарованных частиц и выполненные в рамках различных предположений о происхождении излома в энергетическом спектре ПКИ. Расчет должен быть адекватен экспериментальной процедуре регистрации и отбора событий.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Никольская Н.М., Тук и ш Е.И., Препринт ФИАН N 91, М., 1980.
- [2] Ерлыкин А.Д. и др. В сб. Космические лучи, N 1, 104 (1969).
- [3] Кайдалов А. Б., Тер-Мартirosян К. А., Шабельский Ю. М. ЯФ, **43**, 1282 (1986).
- [4] Деденко Л.Г. и др. Краткие сообщения по физике ФИАН, N 4, 14 (1975).
- [5] Деденко Л.Г., Зацепин Г.Т. Труды 6-й Межд. конф. по космическим лучам, Наука, М., 1960, т. 2, с. 222.
- [6] Яковлев В.И., автореф. докт. дисс. ФИАН, М., 1991.
- [7] Y a k o v l e v V.I., Proc. Int. Seminar on cosmic Ray Cascades, 1980 October, Sofia, p. 111.
- [8] Collaboration of experiment "PAMIR", Proc. of 20th ICRC, Moscow, **5**, 288, 1987.
- [9] Боресков К.Г., Кайдалов А.Б. ЯФ, **37**, 174 (1983).
- [10] Ходжамирян А.Ю., ВАНиТ, серия Тех. физ. эксп., вып. 3/12/, 14 (1982).
- [11] H i l l a s A.M. Inv. talk, Moriond Symp. on Astrophysics, 1984.
- [12] N a g a n o M. et al., Instr. Nu. Studie report 147, 1970.

Поступила в редакцию 10 ноября 1992 г.