УДК 523.165

ПРИЧИНЫ ИЗМЕНЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СПЕКТРА ЭЛЕКТРОНОВ И ГАММА-КВАНТОВ ШИРОКИХ АТМОСФЕРНЫХ ЛИВНЕЙ, ОБРАЗОВАННЫХ КОСМИЧЕСКИМИ ЛУЧАМИ С ЭНЕРГИЕЙ $\sim 10^4$ ТэВ

Д. С. Адамов, В. В. Арабкин, Л. И. Вильданова, П. А. Дятлов, Н. М. Нестерова, Н. М. Никольская, С. И. Никольский, В. П. Павлюченко, В. В. Пискаль, А. Е. Тихонов, К. В. Чердынцева, А. П. Чубенко, С. Б. Шаулов

Объяснение экспериментальных данных об изменении энергетического спектра электронов и гамма-квантов в стволах широких атмосферных ливней при увеличении энергии первичных частиц выше 10^4 ТэВ связывалось ранее с изменением процесса множественного рождения вторичных адронов при переходе от энергий первичных протонов $\lesssim 10^4$ ТэВ к энергиям $\gtrsim 2 \cdot 10^4$ ТэВ. Было предложено также альтернативное объяснение наблюдаемого эффекта возрастанием доли ливней от первичных ядер при увеличении их энергии. Более полный анализ экспериментальных данных эксперимента "АДРОН" подтверждает первую интерпретацию.

Исследования стволов широких атмосферных ливней, вызываемых первичными протонами и ядрами с энергией $10^3 - 10^5$ ТэВ [1, 2], привели к выводу о резком энергетическом пороге для изменения основных характеристик процесса множественного рождения вторичных адронов при энергиях сталкивающихся нуклонов в системе центра инерции $\gtrsim 3$ ТэВ или протонов первичных космических лучей с ядрами атомов воздуха при энергии $\gtrsim 1,8 \cdot 10^4$ ТэВ.

Рис. 1 демонстрирует энергетический порог нового явления и наблюдаемые изменения в стволах широких атмосферных ливней при энергиях первичных протонов и ядер $\gtrsim 10^4$ ТэВ. Энергия первичных частиц, образовавших широкий атмосферный ливень, оценивается по числу электронов в ливне на уровне наблюдения (690 г/см^2). До энергий

первичных частиц 10^4 ТэВ эта оценка соответствует экстраполяции модельных представлений о процессах множественного рождения, исследованных на ускорителях. Такая же оценка получается по измерениям потоков энергии, несомой различными компонентами широкого атмосферного ливня в области энергий первичных частиц $\sim 6 \cdot 10^2 \div 10^4$ ТэВ. Точность оценки энергии первичной частицы по числу электронов в регистрируемом ливне на уровне наблюдения составляет $\sim 30\%$.

При энергиях $> 2 \cdot 10^3$ ТэВ отсутствуют полные экспериментальные данные о нуклон-нуклонных неупругих столкновениях, достаточные для модельной экстраполяции характеристик процесса множественного рождения адронов на область сверхвысоких энергий. Поэтому, если по экспериментальным данным [1, 2] при энергиях первичных протонов и нуклонов $\gtrsim 10^4$ ТэВ как бы прекращается генерация адронов во фрагментационной области, связь между наблюдаемым числом электронов и энергией первичной частицы должна измениться. В случае экспериментов ниже максимума развития ливня отсутствие в первых актах образования ливня адронов во фрагментационной области или увеличение множественности вторичных адронов ведут к занижению энергии первичных частиц, по сравнению с экстраполяцией связи между числом электронов N_e на уровне наблюдения и энергией первичной частицы ($E_0 = 4,7 \cdot 10^{-3} N_e^{0,926}$ ТэВ), установленной и выверенной для области энергий $\lesssim 2 \cdot 10^3$ ТэВ.

Отбор каскадов с заданным числом электронов в ливне на глубине $\sim 700\,\text{г/см}^2$ в атмосфере, содержащих в своих стволах гамма-кванты и электроны с энергией $\gtrsim 2$ ТэВ при суммарной энергии $\sum E_\gamma \gtrsim 10$ ТэВ приводит к зависимости выборки каскадов с заданной энергией первичных частиц от их природы. Каскады с энергией первичных частиц $\lesssim 2 \cdot 10^3$ ТэВ ($N_e \lesssim 10^6$) отбираются с вероятностью $\lesssim 0,01$. Это означает, что регистрируются лишь некоторые первичные протоны, потерявшие в верхних слоях атмосферы малую долю своей энергии. Такие "молодые" ливни могут содержать заниженное число мюонов (рис. 2).

При энергиях первичных частиц $> 10^4$ ТэВ практически во всех стволах широких атмосферных ливней имеются гамма-кванты и электроны с $E_\gamma \gtrsim 2$ ТэВ и $\sum E_\gamma \gtrsim 10$ ТэВ, что должно приводить к увеличению относительного числа мюонов в ливне. На рис. 2 ломаной линией показано ожидаемое изменение относительного числа мюонов при учете эффективности регистрации электронов и гамма-квантов высокой энергии в стволах широких атмосферных ливней, генерированных на границе атмосферы первичными протонами, α-частицами и более тяжелыми ядрами. Предполагаемый состав космических лучей включает в себя 35% протонов, 25% α-частиц, 25% ядер с 12–40 ну-

Рис. 1. Зависимость измеряемой в рентгеноэмульсионных камерах суммарной энергии гамма-квантов и электронов в широких атмосферных ливнях от энергии первичных частиц E_0. Звездочками показан результат выборки ливней с большим значением $\sum E_\gamma$ для восстановления пропорциональности между $\sum E_\gamma$ и E_0.

Рис. 2. Зависимость отношения числа мюонов N_μ к числу электронов N_e для ливней, имеющих в своем стволе гамма-кванты и электроны высокой энергии ($\sum E_\gamma \gtrsim 10$ ТэВ, $E_\gamma \gtrsim 2$ ТэВ) от энергии первичных частиц E_0(I). Ломаной линией представлена ожидаемая зависимость N_μ/N_e для ядерного состава, соответствующего составу космических лучей в области энергий 1–10 ТэВ. Различные выборки ливней: □ – большие значения $\sum E_\gamma$, обеспечивающие пропорциональность между $\sum E_\gamma$ и E_0; △ – ливни с $E_\gamma^{max}/E_0 > 8 \cdot 10^{-4}$; × – ливни, не включенные в выборки по величине $\sum E_\gamma$ и E_γ^{max}/E_0, а число мюонов оценивается по их плотности потока на расстояниях 10–50 м от оси ливня; + – та же группа ливней, но число мюонов оценивается по потоку мюонов на расстояниях до 15 м.

клонами и 15% ядер железа. При имеющихся статистических ошибках наблюдаемая зависимость доли мюонов в регистрируемых рентгеноэмульсионной камерой широких атмосферных ливнях от энергии первичных частиц не противоречит такому ядерному

составу первичных космических лучей.

Рис. 3. Энергетические спектры электронов и гамма-квантов в усредненном ливне с заданной первичной энергией E_0. По оси абсцисс энергия электронов и гамма-квантов, отнесенная к энергии первичной частицы E_0. Кривые – ожидаемые спектры для α-частиц и ядер железа. а) Данные измерений для ливней, генерированных первичными протонами с энергией $(1,7-4)\cdot 10^3$ ТэВ обозначены II (ливни от ядер такой энергии не имеют гамма-квантов с $\sum E_\gamma \gtrsim 10$ ТэВ); I – данные для протонов и ядер с энергией $(4-14)\cdot 10^3$ ТэВ; × – с энергией $(1,4-2,5)\cdot 10^4$ ТэВ; + – с энергией $(2,5-4,4)\cdot 10^4$ ТэВ. б) Выборка из ливней с первичной энергией $E_0 \gtrsim 1,4\cdot 10^4$ ТэВ ливней, обеспечивающих пропорциональность между $\sum E_\gamma$ и E_0 (рис. 1), помечена знаком $\triangle$; ливни, удовлетворяющие критерию $E_\gamma^{max}/E_0 \gtrsim 8\cdot 10^{-4}$, показаны знаком □; ливни, удовлетворяющие обоим условиям – •; ливни, не попавшие в обе вышеуказанные группы, показаны значком о.

Качественно, изменение состава первичного космического излучения, генерирующего широкие ливни различной энергии, может нарушить пропорциональность между суммарной энергией гамма-квантов в семействе ($\sum E_\gamma$) и энергией первичной частицы E_0. То же самое может произойти в результате изменения характеристик процесса множественного рождения вторичных адронов в протон-ядерном неупругом взаимодействии в области энергий первичных частиц $> 10^4$ ТэВ. Практически при такой энергии во всех случаях регистрации ствола широкого атмосферного ливня в нем наблюдаются гамма-кванты с суммарной энергией выше 10 ТэВ. Можно попытаться выбрать часть

ливней, образованных первичными протонами, отобрав ливни с наибольшими $\sum E_\gamma$ таким образом, чтобы их усредненные величины, соответствовали пропорциональности между $\sum E_\gamma$ и E_0 (звездочки на рис. 1). Число отобранных событий составляет от 30% до 50% в различных энергетических интервалах. Однако энергетический спектр гамма-квантов и электронов в отобранных стволах широких ливней соответствует спектру, ожидаемому для ливней, генерированными первичными α-частицами, а не протонами (рис. 3б). Такой же энергетический спектр дает выборка по относительной энергии гамма-кванта наибольшей энергии $E_\gamma^{max}/E_0 \gtrsim 8{\cdot}10^{-4}$, что, согласно моделированию эксперимента, отбирает преимущественно первичные протоны [3]. Энергетический спектр для ливней, попавших в обе выборки, также показан на рис. 3б. Этот спектр наилучшим образом соответствует спектру в ливнях, генерированных α-частицами.

Как видно, попытка отобрать среди широких атмосферных ливней, образованных космическими лучами с энергией $\gtrsim 1,4 \cdot 10^4$ ТэВ, ливни, образованные протонами, используя энергетические характеристики электронно-фотонной компоненты ствола ливня, не удалась. Отобранные по своему энергетическому спектру электронов и гамма-квантов ливни оказались преимущественно ливнями от α-частиц. Значительный относительный поток α-частиц и не обнаруживаемый на их фоне поток протонов в области энергий первичных частиц $> 1,4 \cdot 10^4$ ТэВ может иметь два возможных объяснения. Астрофизическое, традиционное объяснение сводится к резкому, менее чем в десятикратном интервале энергий, исчезновению протонов в потоке первичных космических лучей. Ядерно-физической причиной необнаружения протонов путем отбора ливней с высокоэнергичными гамма-квантами может являться значительное изменение энергетического спектра вторичных адронов в первых актах неупругого столкновения с ядрами атомов воздуха первичных протонов с энергией $> 1,4 \cdot 10^4$ ТэВ [4].

Рассмотрим нашу попытку сгруппировать все наблюдаемые на эксперименте стволы широких атмосферных ливней в астрофизическом варианте объяснения причин изменения энергетического спектра электронов и гамма-квантов. В случае исключения протонов из состава первичного излучения, известного для области энергий $\sim 1 - 10$ ТэВ, доля α-частиц может увеличиться до 50%, что соответствует доле событий со спектром α-частиц. Небольшое отклонение спектра отобранных по критериям больших величин $\sum E_\gamma$ и E_γ^{max}/E_0 событий от ожидаемого при наименьших энергиях (рис. 3б) возможно означает примесь ливней от первичных ядер углерода, азота и кислорода, что компенсируется столь же небольшой примесью ливней от протонов. Оставшиеся стволы ливней после выборки ливней от α-частиц должны соответствовать по своему

энергетическому спектру электронов и гамма-квантов спектру, промежуточному между спектрами от α-частиц и ядер железа. Как следует из рис. 3б экспериментальные данные этому не соответствуют по общему виду энергетического спектра. [1]

Предположение об изменении процесса множественного рождения вторичных адронов при энергетическом пороге $\gtrsim 10^4$ ТэВ, означает уменьшение в несколько раз доли широких атмосферных ливней с полным числом электронов $N_e > 10^7$, образованных протонами, из-за занижения энергии первичных протонов, оцениваемой без учета изменений в первых актах зарождения ливня. Занижение энергии первичных протонов в области энергий $\gtrsim 10^4$ ТэВ приводит к ложному излому [5] в энергетическом спектре космических лучей, так как в целом поток широких ливней с $N_e > 10^7$ занижен, а поток ливней с $N_e \simeq (3-5)\cdot 10^6$ завышен за счет ливней от первичных протонов с $E_0 \gtrsim 1,4\cdot 10^4$ ТэВ. В связи с более высоким энергетическим порогом для аналогичного изменения процесса множественного рождения первичные α-частицы становятся наиболее представленной компонентой первичного космического излучения, генерирующего широкие атмосферные ливни с числом электронов на глубине ~ 700 г/см^2; $10^7 < N_e < 4\cdot 10^7$. Для α-частиц и более тяжелых ядер это энергии первичных частиц $1,4\cdot 10^4$ ТэВ $< E_0 < 6\cdot 10^4$ ТэВ. Энергетический спектр электронов и гамма-квантов для смеси протонов и ядер, после выделения из полного потока ливней, образованных α-частицами, априори достаточно неопределенен (рис. 3б). Изменения относительного числа мюонов при обсуждаемых выше различных группировках широких атмосферных ливней также не противоречат этой интерпретации экспериментальных данных эксперимента "АДРОН", так как группа ливней, содержащая ливни от первичных протонов с изменением первых актов, имеет более широкое пространственное распределение мюонов (рис. 2).

Общим и несомненным выводом изложенных выше результатов анализа экспериментальных данных комплексного эксперимента является необходимость полного по объему и более разностороннего по используемой информации анализа уже имеющегося экспериментального материала.

[1] Этот энергетический спектр характерен слишком малой представленностью электронов и гамма-квантов с энергией $\gtrsim 2$ ТэВ по сравнению с полным потоком электронов в ливне ($N_e \gtrsim 10^7$). Можно предполагать появление в первичном космическом излучении с энергией $\gtrsim 10^4$ ТэВ аномальной компоненты [6], сравнимой по величине потока с потоком протонов и ядер. Однако для сравнения с приводимым экспериментальным материалом гипотеза об аномальной компоненте должна быть более детализированной.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Арабкин В. В. и др. Препринт ФИАН N 140, М., 1990.

[2] Arabkin V. V. et al. 22nd ICRC Papers, Dublin, **4**, 272 (1991).

[3] Dunaevsky A. M., Krutikova N. P., Slavatinsky S. A. 22nd ICRC Papers, Dublin **4**, 133 (1991).

[4] Никольский С. И. ДАН СССР, **316**, 339 (1991).

[5] Nikolsky S. I., Shaulov S. B. 22nd ICRC Papers, Dublin, **2**, 9 (1991).

[6] Шаулов С. Б. Известия РАН, сер. физич., **57**, N 4 (1993).

Поступила в редакцию 10 апреля 1993 г.