

УДК 539.171.017

МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЯВЛЕНИЯ КОМПЛАНАРНОСТИ В ГАММА-СЕМЕЙСТВАХ ПО ДАНЫМ ЭКСПЕРИМЕНТА "ПАМИР"

В. Г. Денисова, Г. Б. Жданов, Р. А. Мухамедшин¹

Обусловленные адронными взаимодействиями в атмосфере характеристики четырех лидирующих кластеров γ -частиц при энергиях семейств > 150 ТэВ сопоставлены с предсказаниями варианта МСО кварк-глюонной струнной модели взаимодействия адронов с ядрами атомов атмосферы. Показано, что наиболее значительные эффекты компланарности проявляются при множественности семейств свыше 20 частиц на распределениях таких величин, как максимальное энергетически взвешенное расстояние между кластерами (Z^{max}), величина ER для лидирующих γ -квантов семейства, а также значения энергии (E) и произведения ER (R – расстояние от центра семейства). Оказалось возможным также указывать оценочные значения энергий первичных космических частиц (E_0^{est}) и сделать некоторые заключения об их природе.

Явление аномально высокой вероятности компланарной структуры семейств частиц, как адронной, так и электронно-фотонной компонент широких атмосферных ливней (ШАЛ), уже отмечалось ранее в ряде независимых исследований. К анализу целого ряда характерных параметров будут привлекаться уже рассмотренные ранее [1] данные по электронно-фотонным семействам, зарегистрированным в так называемых Г-блоках [2]

¹Институт ядерных исследований РАН.

рентгенэмульсионных камер (см. рис. 1), экспонированных в течение многих лет в ходе памирских экспедиций ФИАН.

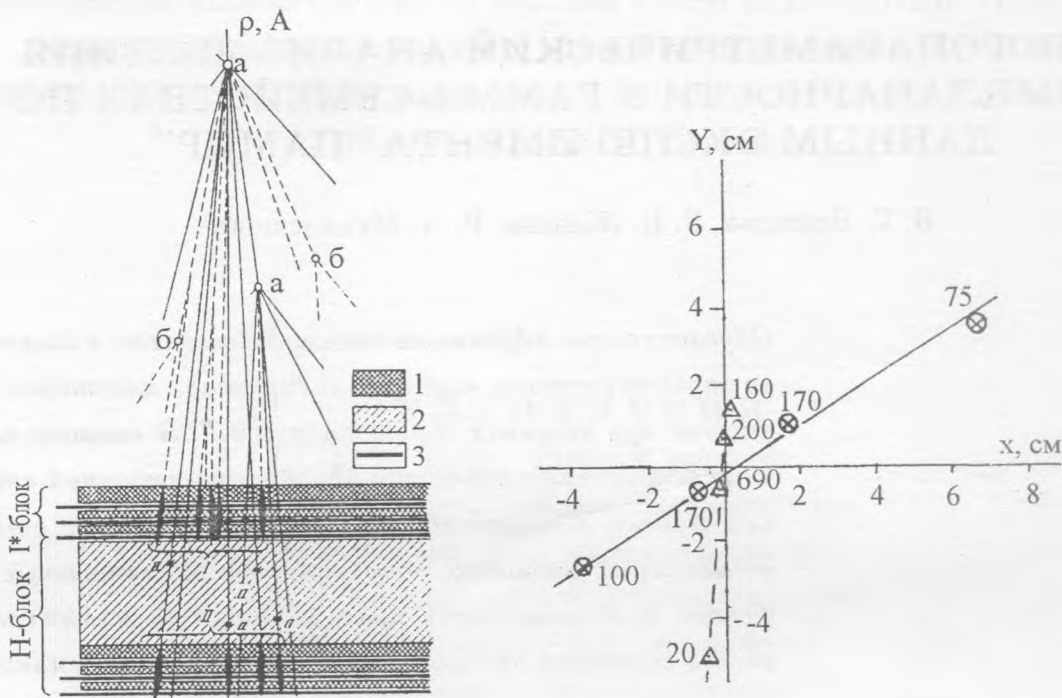


Рис. 1. Схема типичной углеродной рентгенэмульсионной камеры на Памире. Толщины свинцовых слоев – по 1 см каждый (двойная штриховка). Верхняя часть камеры считается Г-блоком. Адронный блок (Н) – углеродный (косая штриховка). Сплошными линиями указаны слои рентгеновской фотоэмульсии. Символами а и б обозначены точки взаимодействия адронов и электронов, соответственно, I и II – семейства лидирующих гамма-квантов и адронов, соответственно.

Рис. 2. Иллюстрация явления выстроенности лидирующих частиц в γ -семействе. В данном случае наблюдалась вторая (пунктирная) линия выстроенности частиц более низких энергий.

На основании ряда публикаций [3 – 6] можно говорить о высокой степени достоверности явления компланарности семейств. При этом сам факт аномалии следует из сопоставления экспериментальных данных с той или иной теоретической моделью образования семейств частиц в процессе развития ШАЛ. Мы полагаем, что ближе других подошла к описанию основных характеристик каскадов модель, исходящая из концепции кварк-глюонных струн (КГС) в варианте МСО [7], с которым и будут проводиться

все последующие сопоставления данных эксперимента "Памир".

Своеобразный случай "дважды выстроенного" семейства представлен на рис. 2, который, в принципе, можно связать с большими поперечными импульсами вторичных адронов в процессе развития ядерных каскадов в атмосфере.

Существенной чертой процесса обработки данных, как и в работе [2], была операция так называемого декаскадирования частиц, т.е. объединения их в структуры, генетически связанные с вылетом исходных γ -квантов или π^0 -мезонов при взаимодействии адронов высокой энергии ($\sim 10^{16}$ эВ) с ядрами атомов атмосферы. При этом в качестве параметра декаскадирования используется величина $Z_{ik}^m = \max[r_{ik}(E_i^{-1} + E_k^{-1})^{-1}]$, где r_{ik} – расстояния (в см) между парами частиц в плоскости "мишени", а E_i, E_k – энергии этих частиц в T эВ.

Как и в работе [1], речь будет идти о выстроенности четырех лидирующих по энергии кластеров частиц, и мерой выстроенности будет считаться величина $\lambda_4 = \langle \cos 2\varphi_{ij}^k \rangle$, где φ_{ij}^k – это угол между прямыми, соединяющими попарно четыре кластера частиц. Однако, в отличие от данных работы [1], мы убедились, что существенные черты выстроенности проявляются уже при более мягком условии $\lambda_4 > 0.6$, а не $\lambda_4 > 0.8$, а также при множественности частиц семейства $N_\gamma^* > 20$ при энергетическом пороге 8 T эВ и суммарной энергии частиц семейства 150 T эВ, вместо условий на энергию кластера $E_{cl} > 50 T$ эВ и на число кластеров N_{cl} , которые задавались в работе [6].

В отличие от работы В. П. Павлюченко [5], где исследовались данные ионизационного калориметра с большой статистической обеспеченностью (многие тысячи событий), но зато эффект выстроенности наблюдался только по тройкам одиночных адронов, во всех рентгенэмульсионных работах фиксировалась компланарность четырех γ -квантов, π^0 -мезонов или адронных кластеров разной степени декаскадированности, но зато с малой (десятки событий) множественностью. Поэтому мы считаем важным провести анализ данных Г-блоков по целому ряду характеристик.

Пространственные распределения

Отбор семейств по множественности и оценка высоты их генерации. Простейшей характеристикой семейства частиц, регистрируемого в Г-блоке рентгенэмульсионной камеры, является полное число электронов или фотонов (N_γ), рождающих в камере отдельно различимый каскад с энергией E_γ выше некоторого порога, выбранного нами равным 8 T эВ, при условии, что его расстояние R_γ от энергетически взвешенного центра семейства не превышает 15 см. Распределение по числу таких частиц (N_γ^*) при

условии, что их суммарная энергия ΣE_γ была не ниже 150 ТэВ , а параметр выстроенности $\lambda_4 > 0.6$, представлено на рис. 3, где оно сопоставлено с предсказаниями модели МСО при статистической обеспеченности событий 28 и 60 соответственно.

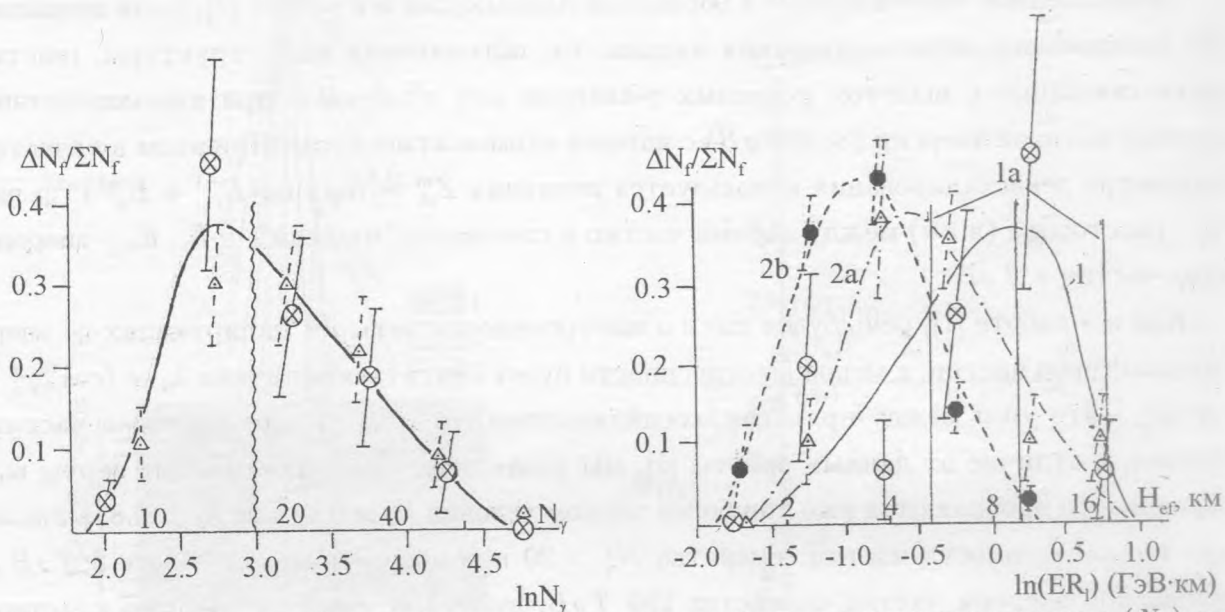


Рис. 3. Распределение декаскадированных гамма-семейств по множественности (N_f) при пороге деэкаскадирования $Z_c^1 = 4 \text{ ТэВ} \cdot \text{см}$; эксперимент (\otimes) и модель МСО (Δ).

Рис. 4. Распределения пространственных характеристик (ER_{cl1}) лидирующих кластеров в семействах: 1, 1a – эксперимент "Памир" при отборах по параметру выстроенности $\lambda_4 \geq 0.6$ (\otimes) и $\lambda_4 \geq -0.4$ (метками 1a обозначены вертикальные линии, проведенные как на уровне среднего значения, так и на уровнях среднего + стандартное отклонение и среднего - стандартное отклонение); 2a, 2b – модель МСО при $\lambda_4 \geq 0.6$, первичные протоны (Δ) и ядра с $A \geq 4$ (\bullet). Эксперимент: $N_\gamma^* \geq 20$ (\otimes) 1a, $N_\gamma^* \geq 4$ (1b).

Проведя условно границы между событиями большой ($N_\gamma^* \geq 20$) и малой ($N_\gamma^* < 20$) множественности, мы даем в табл. 1 соотношение "умеренно выстроенных" ($\lambda_4 = 0.6 - 0.8$) и "хорошо выстроенных" ($\lambda_4 \geq 0.8$) кластеров адрон-ядерного происхождения для граничных параметров адронного декаскадирования $Z_{ik}^m = Z_c = 20$ и $30 \text{ ТэВ} \cdot \text{см}$ по данным эксперимента и модели МСО.

Т а б л и ц а 1

Соотношения числа ΔN_f выстроенных γ -семейств с параметрами $\lambda_4 = 0.6 - 0.8/\lambda_4 > 0.8$

		EXP $N_\gamma^* < 20$	EXP $N_\gamma^* > 20$	МСО $N_\gamma^* < 20$	МСО $N_\gamma^* > 20$
ΔN_f	$Z_c = 30$	10/4	4/10	13/10	21/14
ΔN_f	$Z_c = 20$	9/7	6/11	24/20	20/12

Из таблицы видно, что при пороге кластеризации $Z_c = 30 \text{ ТэВ} \cdot \text{см}$ различие между экспериментом и моделью проступает, хотя и в пределах статистических ошибок, более четко, чем при $Z_c = 20 \text{ ТэВ} \cdot \text{см}$ на общей статистике событий 86 и 108 соответственно.

Т а б л и ц а 2

Средние значения величин ER_1 в \ln масштабе при множественности $N_\gamma > 20$

	EXP	МСО, $A > 0$	
$Z_c = 30 \text{ ТэВ} \cdot \text{см}$	-0.11 ± 0.14	-0.39 ± 0.08	
$Z_c = 20 \text{ ТэВ} \cdot \text{см}$	-0.28 ± 0.17	МСО, p	МСО, $A > 4$
		$-1.1 \pm 0/1$	-0.53 ± 0.09

Определенный интерес представляет распределение по высотам генерации исследуемых γ -семейств, точнее, их лидирующей части, к которой относятся декаскадированные γ -кванты с энергиями $E^* = E_2/3 - E_1$, где E_2, E_1 – энергия второго и первого по порядку убывания энергии γ -квантов. Если ориентироваться на общепринятое значение среднего поперечного импульса π^0 -мезона при высоких энергиях, равное $0.5 \text{ ГэВ}/c$ (а именно π^0 -мезон надо иметь в виду, когда порог декаскадирования выбирается $4 \text{ ТэВ} \cdot \text{см}$), то можно перейти от значения ER_1 для лидирующей части семейства к высоте ее генерации. В табл. 2 представлены данные для выстроенных семейств, в которых множественность $N_\gamma \geq 20$ и эффект выстроенности проявляется более четко. Кроме того, в табл. 2 представлены данные для обоих вариантов выделения кластеров по величине Z_c , причем для случая $Z_c = 20 \text{ ТэВ} \cdot \text{см}$ проведено разделение событий по модели МСО на чисто протонные (p) и ядерные ($A > 4$). Наиболее интересны данные четвертой строки табл. 2, из которой следует, что при условии принятых выше значений поперечных импульсов каскадных π^0 -мезонов протонная компонента первичных космических лучей (ПКЛ) выдала бы высоты генерации выстроенных событий в 2 –

2.5 раза ниже наблюдаемых. Хотя допущение большого вклада ядерной компоненты могло бы заметно сгладить это расхождение, как будет видно далее, оно противоречит не только предсказаниям модели МСО, но и некоторым важным экспериментальным параметрам семейств, рассмотренным ниже.

Пространственные характеристики одного и четырех лидирующих кластеров семейства. После оценок эффективной высоты генерации лидирующих частиц в виде одного γ -кванта или одного π^0 -мезона представляет интерес выяснить пространственные масштабы кластеров, выделяемых для собирания продуктов адронных взаимодействий с ядрами атомов воздуха. С этой целью мы приводим на рис. 4 и в табл. 3 данные о распределениях (в логарифмических масштабах) числа семейств (N_f) по значениям ER для первых четырех кластеров максимальной энергии по данному семейству (при сохранении прежней нижней границы $\Sigma E_\gamma > 150 \text{ ТэВ}$). Видно, что по своим пространственным характеристикам экспериментальные данные по лидирующим кластерам явно выходят за пределы предсказаний модели МСО, особенно, если установить дополнительно нижнюю границу $N_\gamma^* > 20$ для множественности рассматриваемых семейств.

Т а б л и ц а 3

Пространственные характеристики лидирующего кластера в семействе (ln-шкала)

	EXP	МСО, p	МСО, $A > 4$
$\langle \ln(Er_{cl1}) \rangle, Z_c = 4/30$	0.67 ± 0.13	0.0 ± 0.12	0.54 ± 0.12
	EXP	МСО, $A > 0$	
$\langle \ln(Er_{cl1}) \rangle, Z_c = 2/20$	0.69 ± 0.21	-0.01 ± 0.19	

Т а б л и ц а 4

Максимальные энергетически взвешенные пространственные расстояния среди четырех лидирующих кластеров семейства (ln-шкала)

$N_\gamma^* > 20$	EXP	МСО, p, α	МСО, $A > 4$
$\langle \ln Z^{max} \rangle, \lambda_4 > 0.6$	1.12 ± 0.15	0.38 ± 0.08	0.99 ± 0.18
	EXP	МСО, $A > 0$	
$\langle \ln Z^{max} \rangle, \lambda_4 > 0.8$	1.12 ± 0.16	0.54 ± 0.14	

Далее, на рис. 5 и в табл. 4 мы приводим данные о максимальных энергетически взвешенных расстояниях Z^{max} (снова в логарифмических масштабах) в пределах четырех лидирующих кластеров семейства при множественности $N_\gamma^* > 20$. И на этот раз

видно, что если при мягком ограничении параметра выстроенности $\lambda_4 > 0.6$ эксперимент согласуется с предсказаниями модели лишь для чисто ядерного состава ПКЛ, то при более сильной выстроенности ($\lambda_4 \geq 0.8$) отличие экспериментальных пространственных распределений для всего сложного ядерного состава ПКЛ составляет 2.5 – 3 стандартных отклонения.

Пожалуй, наиболее впечатляют представленные в табл. 6 данные по максимальным энергетически взвешенным расстояниям между парами из четырех лидирующих кластеров семейств высокой ($N_\gamma \geq 20$) множественности.

Энергия и массовый состав первичных частиц

Оценка энергии первичной космической частицы. В качестве меры оценки энергии первичной частицы по данным на уровне наблюдения (4370 м над уровнем моря) можно использовать (см. рис. 6) как множественность частиц N_γ с надпороговой энергией (в нашем случае 8 ТэВ), так и сумму соответствующих произведений $E_\gamma R_\gamma$ энергии e, γ -частиц на их расстояния от энергетически взвешенного центра (ЭВЦ) семейства. Более адекватной величиной для оценки первичной энергии является величина $\Sigma E_\gamma R_\gamma$, и корреляция оценочных значений первичной энергии с этой величиной неплохо подчиняется линейному закону

$$\lg E_0^{est}(\text{ПэВ}) = 0.24 + 0.42 \ln(\Sigma E_\gamma R_\gamma). \quad (1)$$

Как следует из рис. 6 и соотношения (1), оба эти способа не вполне эквивалентны, поскольку на эксперименте "Памир" величина $\Sigma E_\gamma R_\gamma$ растет с множественностью несколько быстрее, чем это следует из модели МСО. Так, при $N_\gamma = 80$ разница в E_0 достигает примерно двойки, а коэффициенты корреляции этих двух величин составляют, соответственно, 0.45 ± 0.05 и 0.38 ± 0.05 . Тем не менее, мы вначале оценивали первичную энергию, исходя из вполне ощутимой корреляции между множественностью гамма-квантов и модельным значением первичной энергии E_0^{est} . Из рис. 6 видно, что, если полагаться на предсказания модели, то первичная энергия 10^{17} эВ оказывается достижимой уже при значениях N_γ порядка 80.

Исходя из полученной на основе соотношения (1) корреляции, мы получили распределения оценочных значений первичной энергии (см. рис. 7) для трех выборок. Первая из них (кривая 1) построена по той части эксперимента, когда использовался либо простой Г-блок, либо свинцовая камера; вторая (кривая 2а) отвечает модельным данным для первичных протонов, третья (2б) – для ядер, начиная с гелия. Видно, что если нет

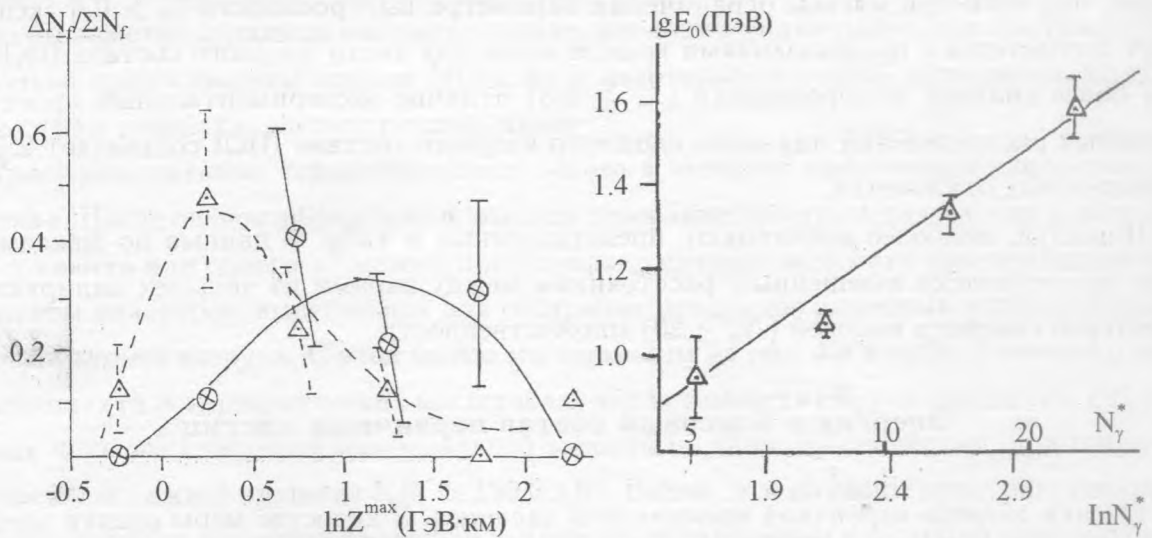


Рис. 5. Распределения (на логарифмической шкале) максимальных энергетически взвешенных расстояний $Z^{max} = \max[R_{ik}(E_i E_k / (E_i + E_k))]$ для первичных протонов по модели МСО (Δ) и на эксперименте (\otimes) при отборе семейств высокой множественности ($N_\gamma^* \geq 20$) и высокой выстроенности ($\lambda_4 \geq 0.8$).

Рис. 6. Корреляция между множественностью декаскадированных гамма-квантов в семействе (N_γ^*) и первичной энергией согласно модели МСО (Δ).

роста поперечных импульсов вторичных частиц (что отнюдь не очевидно), то экспериментальное распределение оценочных значений первичной энергии скорее соответствует ядрам.

Т а б л и ц а 5

Средние оценки первичных энергий, эксперимент и модель МСО (lg-шкала)

	EXP	МСО, p	МСО, $A > 4$
$\langle \lg E_0^{est} \rangle, Z_c = 2/20$	1.63 ± 0.09	1.26 ± 0.03	1.46 ± 0.08

Более показательны данные табл. 5, в которой представлены только "хорошо выстроенные" семейства с параметром выстроенности $\lambda_4 > 0.8$, измеренные в углеродной камере. Видно, что даже если бы мы наблюдали гамма-семейства только от первичных ядер с $A > 4$ (что крайне маловероятно), первичная энергия, определяемая через $(\Sigma E_\gamma R_\gamma)$, при нормальных поперечных импульсах рождаемых частиц оказалась бы значительно ниже наблюдаемой. Поскольку большая часть семейств заведомо образована

протонами, то этот результат можно истолковать как следствие повышенных значений поперечных импульсов, по крайней мере, для первичных ядерных каскадов в атмосфере. Вполне возможно, что этот результат связан с генерацией частиц большой массы при достаточно высоких энергиях первичных адронов.

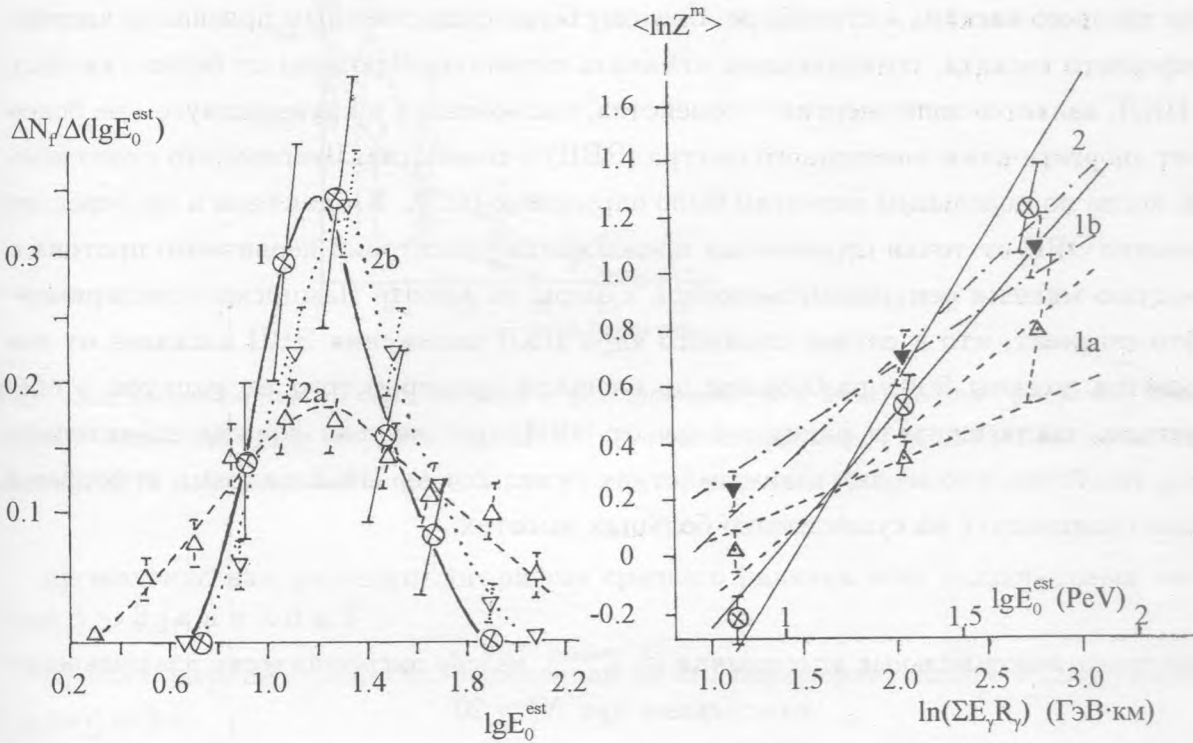


Рис. 7. Сравнительные распределения оценочных значений первичной энергии $\lg E_0^{est} = 0.24 + 0.42 \ln(\Sigma E_\gamma R_\gamma)$ для выстроенных семейств по модели МСО для протонов (Δ , 2a) и ядер с $A \geq 4$ (2b, ∇) с экспериментом по данным Г-блока (1, \otimes).

Рис. 8. Корреляция между величиной $\ln(\Sigma E_\gamma R_\gamma)$ и максимальным энергетически взвешенным расстоянием между парой из четырех лидирующих кластеров Z^{max} : коэффициенты корреляции $r = 0.88 \pm 0.01$ на эксперименте (\otimes , 2) и в модели МСО для протонов $r_p = 0.53 \pm 0.08$ (Δ , 1a) и ядер с массой $A \geq 4$ - $r_A = 0.94 \pm 0.01$ (∇ , 1b).

О влиянии массы первичного ядра на пространственные распределения частиц γ -семейства. Одним из возможных критериев состава первичного излучения может служить представленная на рис. 8 корреляция энергетически взвешенных расстояний между парами из четырех лидирующих кластеров компланарных (с $\lambda_4 \geq 0.6$) семейств высокой множественности при параметре адронного декаскадирования $Z_c = 20$ ТэВ·см,

представленная в сопоставлении с модельными предсказаниями также в табл. 6. Из нее, казалось бы, следует, что поперечные характеристики лидирующих кластеров для компланарных семейств сравнимы с моделью МСО лишь при отборе достаточно тяжелых первичных космических лучей (ПКЛ). Однако следует иметь в виду, что для тяжелых ядер ПКЛ большой разброс величин $\Sigma E_\gamma R_\gamma$ может объясняться большими высотами начала ядерного каскада в атмосфере. Поэтому более существенным признаком ядерно-атмосферного каскада, позволяющим отличать первичные протоны от более тяжелых ядер ПКЛ, является доля энергии γ -семейства, заключенная в круге радиусом не более 1 см от энергетически взвешенного центра (ЭВЦ) γ -семейства. Впервые это стало ясно тогда, когда по модельным расчетам было определено (С. А. Юлдашбаев и др.) среднее отклонение ЭВЦ от точки пересечения продолжения траектории первичного протона с плоскостью мишени рентгенэмульсионной камеры на высоте Памирского эксперимента. Это означает, что в случае сложного ядра ПКЛ положения ЭВЦ каскадов от его фрагментов должны быть разбросаны по площади примерно того же радиуса, а следовательно, заключенная в радиусе 1 см от ЭВЦ доля энергии должна значительно упасть, тем более, что первые взаимодействия тяжелых ядер ПКЛ с ядрами атмосферы должны происходить на существенно больших высотах.

Т а б л и ц а 6

Усредненные максимальные расстояния $\langle \ln Z^{max} \rangle$ между энергетически взвешенными кластерами при $N_\gamma^* > 20$

	EXP	МСО, p, α	МСО, $A > 4$
$\lambda_4 > 0.6$	1.12 ± 0.15	0.38 ± 0.15	0.99 ± 0.18
	EXP	МСО, $A > 0$	
$\lambda_4 > 0.8$	1.12 ± 0.16	0.54 ± 0.14	

Ввиду этого мы избрали в качестве главного индикатора первичного состава параметр $\xi = \ln[\Sigma E_\gamma / E_\gamma(R \leq 1 \text{ см})]$ и по распределению этих параметров произвели сопоставление эксперимента с моделью для "умеренно выстроенных" событий ($\lambda_4 > 0.6$), представленное на рис. 9. Из этого рисунка видно, что события протонного происхождения в первом приближении неплохо описывают ситуацию, ибо доля событий ($\sim 50\%$) с параметром $\xi < 0.6$ согласуется с ожидаемой в пределах однократной статистической погрешности.

Несколько менее чувствительным критерием для оценки доли событий от тяжелых ядер ПКЛ может служить выполнение сразу двух условий:

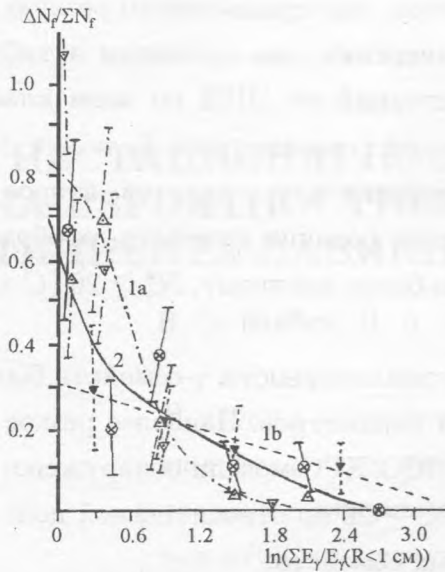


Рис. 9. Распределения по доле энергии в центральной ($R < 1$ см) части "умеренно выстроенных" семейств ($\lambda_4 \geq 0.6$). Модель МСО: первичные протоны (1а, Δ) и первичные ядра с $A > 4$ (1b, ∇). Эксперимент: (2, \otimes).

а) значение натурального логарифма среднего радиуса всех надпороговых частиц $\langle \ln R_\gamma \rangle > 1.3$;

б) доля энергии семейства, выделенная на его периферии, точнее $\ln[\Sigma E_\gamma / E_\gamma(R_\gamma \geq 7.5 \text{ см})] < 2.4$.

Такого рода оценка в общем согласуется с предсказаниями модели МСО. Правда, если учесть, что поперечные импульсы лидирующих частиц у выстроенных семейств имеют повышенные значения, то и необходимую для выполнения условий (а) и (б) долю средних и тяжелых ядер ПКЛ пришлось бы допустить существенно более низкой, чем 50%, и она будет сравнима с оценкой $18 \pm 5\%$, предсказываемой по модели МСО.

Т а б л и ц а 7

Энергетически взвешенные расстояния от центра выстроенных ($\lambda_4 > 0.8$) семейств, усредненные по всем его кластерам

	EXP, Г-блок	EXP, С-камера	МСО, p	МСО, $A > 4$
$\langle \ln E_{cl} R_{cl} \rangle, T \text{ эВ} \cdot \text{см}$	-0.07 ± 0.18	-2.05 ± 0.12	-0.11 ± 0.05	0.15 ± 0.06

В качестве дополнительного параметра, подчеркивающего резкую выделенность четырех лидирующих кластеров по их энергиям, мы приводим в табл. 7 средние значения энергетически взвешенных расстояний от ЭВЦ по всем кластерам семейств, после двухступенчатого декаскадирования с параметром $Z_c = 4$ и $30 \text{ ТэВ} \cdot \text{см}$ (первое число означает предел декаскадирования для γ -квантов, второе – для кластеров адронного происхождения). Видна резкая разница семейств, отобранных вначале по мягкому $N_\gamma^* \geq 4$ (Г-блок), а позднее – по более жесткому, $N_\gamma^* \geq 20$ (С-камера) критерию множественности семейств.

Заключение. Для анализа явления компланарности γ -семейств было использовано 9 частично коррелирующих между собой параметров. Наиболее резкое отличие от соответствующих предсказаний варианта МСО КГС-модели обнаружено:

а) при множественности семейств $N_\gamma^* \geq 20$ по относительной доле сильно ($\lambda_4 \geq 0.8$) и умеренно ($\lambda_4 = 0.6 - 0.8$) выстроенных семейств;

б) по максимальному энергетически взвешенному удалению Z^{max} двух лидирующих кластеров из четырех. Основная часть эффекта компланарности, по-видимому, связана с протонной компонентой первичного излучения.

Авторы благодарят С. А. Славатинского, А. С. Борисова, В. М. Максименко и В. С. Пучкова за обсуждение статьи.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] Slavatskiy S. A. Nucl. Phys. B, **52B**, 56 (1997).
- [2] Pamir Experiment Collaboration, Trudy FIAN, **154**, 3 (1985).
- [3] Koponkin V. V., Managadze A. K., Rakobolskaya I. V., Roganova T. M. Phys. Rev. D, **52**, N 5, 2776 (1995).
- [4] Capdevielle J. P. et al. Proc. 25th ICRC, Durban, **6**, 57 (1997).
- [5] Павлюченко В. П. Изв. АН, сер. физ., **63**, N 3, 457 (1965).
- [6] Borisov A. S., Maximenko V. M., Puchkov V. S., et al. Nucl. Phys. B, **75A**, 144 (1999).
- [7] Fedorova G. F. and Mukhamedshin R. A. Bull. Soc. Sci. Lett., Lodz, **16**, 61 (1994).

Поступила в редакцию 12 ноября 1999 г.