

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ АДРОНОВ НА УРОВНЕ ГОР  
В ШИРОКИХ АТМОСФЕРНЫХ ЛИВНЯХ, ОБРАЗОВАННЫХ ПЕРВИЧНЫМИ  
ЧАСТИЦАМИ С ЭНЕРГИЕЙ  $\sim 10^{15}$  ЭВ

А. Г. Дубовый, Н. М. Нестерова, В. А. Ромахин

УДК 539.171

На комплексной установке Тянь-Шаньской станции получены экспериментальные данные о пространственном распределении адронов с энергией  $E_a = 0,5 - 10$  ТэВ в ливнях с полным числом частиц  $5 \cdot 10^5$ , которые свидетельствуют о возможности существенного увеличения перпендикулярного импульса во взаимодействиях частиц при энергиях больше  $10^{14}$  эВ.

Пространственное распределение адронов с энергией  $E_a = 0,45 - 10$  ТэВ в широких атмосферных ливнях (ШАЛ) с полным числом частиц  $> 10^5$  получено при обработке около 2000 ливней, зарегистрированных Тянь-Шаньской комплексной установкой /1,2/. Характеристики ливней - координаты оси  $X_0, Y_0$ , полное число частиц  $N_0$ , параметр возраста  $S$  - определялись по показаниям сцинтилляционных и газоразрядных счетчиков. Энергия адронов и их координаты регистрировались ионизационным калориметром площадью  $36 \text{ м}^2$ .

Средняя высота последнего над уровнем наблюдения взаимодействия адронов такова ( $\sim 1$  км), что значительная доля вторичных адронов высоких энергий, образованных в этом взаимодействии, будет сосредоточена на уровне наблюдения в области, размеры которой меньше, чем разрешающая способность используемых в настоящее время детекторов адронов. Поэтому четко разделенные друг от друга струи, наблюдаемые в этих детекторах, образованы не одиночными адронами, а группой адронов. С помощью расчетов /3/ было установлено, что энергия, выделенная струей в нашем калориметре на

глубине большей  $150 \text{ г/см}^2$ , равна энергии адрона, генерировавшего эту струю в последнем взаимодействии над установкой.

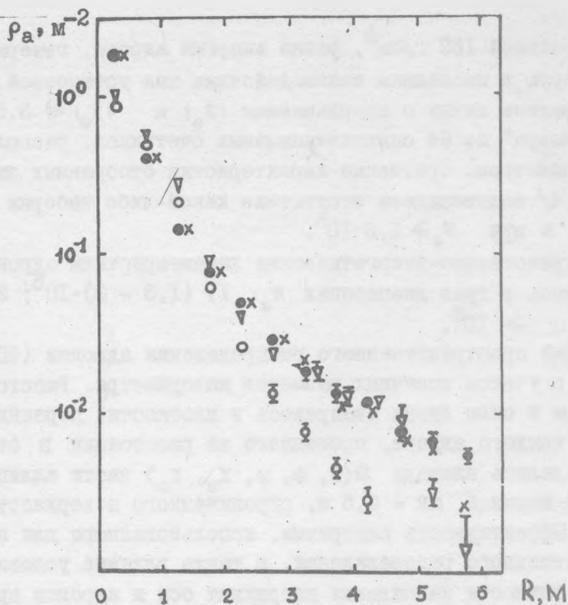
Отбирались ливни с координатами  $|X_0|$  и  $|Y_0| \leq 3,5 \text{ м}$  на уровне "ковра" из 64 сцинтилляционных счетчиков, расположенных над калориметром. Сравнение характеристик отобранных ливней с данными /4/ подтверждает отсутствие какой-либо выборки событий по  $N_0$  и  $Z$  при  $N_0 > 1,3 \cdot 10^5$ .

Пространственно-энергетические характеристики адронов рассматривались в трех диапазонах  $N_0$ : 1)  $(1,3 - 3) \cdot 10^5$ ; 2)  $(3 - 10) \times 10^5$ ; 3)  $\geq 10^6$ .

Функция пространственного распределения адронов (ФПР) была получена с учетом конечных размеров калориметра. Расстояние между адроном и осью ливня измерялось в плоскости, перпендикулярной оси. Для каждого адрона, прошедшего на расстоянии  $R$  от оси ливня, вычислялась площадь  $\Omega(R, \theta, \varphi, X_0, Y_0)$  части эллиптического кольца шириной  $\Delta R = 0,5 \text{ м}$ , ограниченного поверхностью калориметра. Эффективность алгоритма, использованного для получения пространственного распределения, а также влияние условий отбора ливней и точности нахождения координат оси и адронов проверялись расчетами по методу Монте-Карло. На рис. 1 представлены задаваемое, регистрируемое и восстановленное примененным нами методом пространственные распределения адронов при условии, когда оси ливней распределены равномерно в области  $|X_0|, |Y_0| \leq 3,5 \text{ м}$ . Распределение ошибок в определении координат оси ливня и адрона принималось гауссовым с  $\sigma_0 = 0,75 \text{ м}$  и  $\sigma_a = 0,25 \text{ м}$  соответственно. Такие значения  $\sigma$  получены при оценке точности определения координат по показаниям сцинтилляционных счетчиков и ионизационных камер. На том же рис. 1 показана восстановленная ФПР в предположении отсутствия ошибок в определении координат оси и адронов. Из рис. 1 видно, что алгоритм восстановления ФПР при отборе осей с координатами  $|X_0|, |Y_0| \leq 3,5 \text{ м}$  от центра установки правильно восстанавливает эту функцию на расстояниях до 5 м.

На рис. 2 представлена зависимость средней плотности потока адронов с энергией больше 0,45; 1,0; 3,0 и 10,0 ТэВ на ливень от расстояния до оси ШАЛ  $R$  (ФПР) в интервале  $N_0 = (3 - 10) \cdot 10^5$ . Среднее значение  $\langle N_0 \rangle$  в этом интервале равно  $4,7 \cdot 10^5$ , что соответствует энергии первичной частицы  $E_0 \approx 10^{15} \text{ эВ}$ .

Для всех перечисленных энергий адронов были исследованы ФПР



Р и с. 1. Результат проверки правильности восстановления пространственного распределения адронов  $\rho_a(R)$  с помощью розыгрыша искусственных событий.  $\rho_a(R)$  заданное  $\bullet$ ,  $\rho_a(R)$  полученные в результате розыгрыша: без учета  $\Omega^{-1}$  -  $\circ$  и с учетом  $\Omega^{-1}$  -  $\nabla$  при  $\sigma_a = 0,25$ ,  $\sigma_o = 0,75$ , а также с учетом  $\Omega^{-1}$  -  $\times$  при  $\sigma_a = \sigma_o = 0$

до расстояний 5 м от оси ливня. Ось ливня определялась двумя способами: 1) за координаты оси ливня принимались координаты адрона с максимальной энергией в ливне; 2) координаты оси определялись по показаниям сцинтилляционных детекторов. На рис. 2 для адрона с  $E_a \geq 3$  ТэВ показана ФПР для случая определения координат оси только первым способом, а для адронов с энергией  $\geq 0,45$  ТэВ и  $\geq 1$  ТэВ - двумя способами. Эти функции в интервале расстояний 1 - 5 м можно аппроксимировать законом  $\exp(-R/R_0)$ . Значения параметра  $R_0$  для адронов разных энергий даны в таблице I. Там

Таблица I

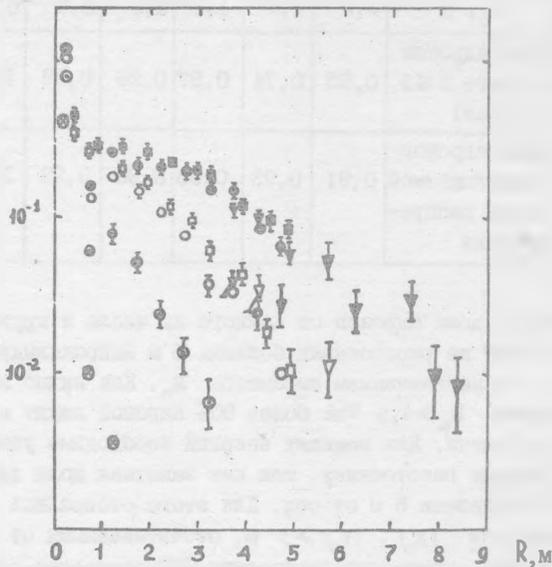
$E_a$ , ТэВ	0,45	0,65	1,1	1,8	3,0	5,6
$R_0$ , м	2,2	1,9	1,4	1,0	0,7	0,5
Доля адронов в круге $R \leq 5$ (от оси)	0,65	0,74	0,87	0,96	0,99	1,0
Доля адронов в наблюдаемой части распределения	0,91	0,93	0,95	0,96	0,99	1,0

же приведена доля адронов от полного их числа в круге радиусом 5 м, если ФПР на расстояниях больших 5 м аппроксимировать экспонентой с тем же значением параметра  $R_0$ . Как видно из таблицы I, при энергиях  $E_a \geq 1,5$  ТэВ более 90% адронов лежит в пределах 5 м от оси ливня. Для меньших энергий необходимо уточнить вид ФПР на больших расстояниях, так как заметная доля таких адронов лежит за пределами 5 м от оси. Для этого отбирались ливни с координатами оси  $|X_0|, |Y_0| \geq 3$  м, отсчитываемыми от центра установки. В этом случае при построении ФПР положение оси ливня определялась вторым способом, по показаниям спинтилляционных детекторов. Как видно из рис. 1, этот способ, имеющий меньшую, чем первый, точность определения координат оси, не искажает ФПР при  $R_0 \geq 1$  м, что также подтверждается данными эксперимента, приведенными на рис. 2. Таким образом, ФПР была определена до расстояний, при которых доля адронов с энергией  $E_a \geq 0,45$  ТэВ составляет более 90% от полного их числа.

На рис. 3 показаны ФПР адронов для двух интервалов зенитных углов прихода ливней с  $N_a = (3,0 - 10,0) \cdot 10^5$ . Средние значения зенитных углов  $\theta$  равны  $15^\circ$  и  $34^\circ$ . Аналогичные ФПР адронов получены и для двух других диапазонов  $N_a$ .

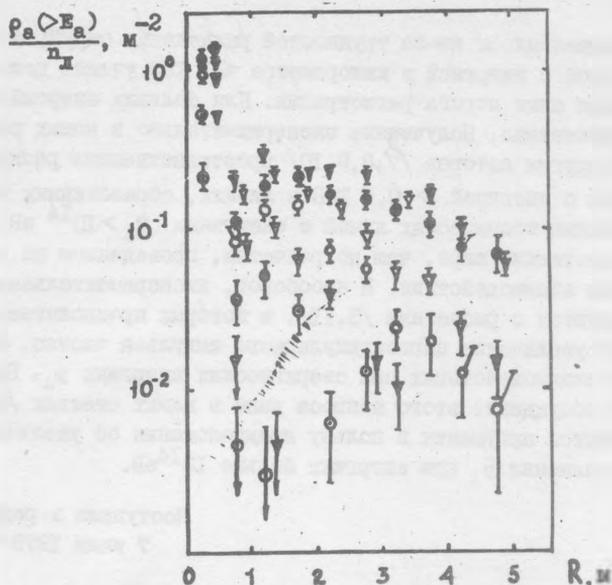
В отличие от работ /4,5,6/ в настоящей статье учтена зависимость  $R$  и  $\Omega^{-1}$  от  $\epsilon$  и  $\varphi$ . Особое внимание было обращено на абсолютное число адронов и число ливней в заданных интервалах числа частиц  $N_e$  и зенитных углов  $\theta$ . Рассматривались ливни с

$$\frac{\rho_a(>E_a)}{n_L}, \text{ м}^{-2}$$



Р и с. 2. Пространственные распределения адронов с энергией  $> E_a$  в широких атмосферных ливнях с  $\langle N_0 \rangle = 4,7 \cdot 10^5$  на уровне гор,  $\rho_a$  - плотность потока адронов,  $n_L$  - число ливней в интервале  $N_a$ .

$E_a, \text{ ТэВ}$	$>0,45$	$>1,0$	$>3,0$	$>10,0$	Ось определена:
$ X_0, Y_0  \leq 3,5, \text{ м}$	•	◦	◦	◦	по адрону с максимальной энергией в калориметре
$ X_0, Y_0  \leq 3,5, \text{ м}$	■	□			по электронно-фотонной компоненте в калориметрах
$ X_0, Y_0  \geq 3,0, \text{ м}$	▼	▼			" "



Р и с. 3. Пространственное распределение адронов с энергиями  $>E_a$  в широких атмосферных ливнях с  $\langle N_0 \rangle = 4,7 \cdot 10^5$  на уровне гор,  $\rho_a$  - плотность потока адронов,  $n_L$  - число ливней в интервале  $N_0 = (3-10) \cdot 10^5$

$E_a, \text{ТэВ}$	$>0,45$	$>1,0$	$>3,0$	$>10,0$	Средний зенитный угол $\langle \theta \rangle$
	▽	▽	▽	▽	$15^\circ$
	•	○	•	•	$35^\circ$

координатами оси  $|x_0|, |y_0| \leq 3,5$  м на уровне поверхности калориметра. После дополнительной обработки 1) были выделены струи адронов; зарегистрированные калориметром, в интервале  $E_a = 0,3 - 1,0$  ТэВ; 2) проведено разделение струй адронов, слившихся по одной из проекций калориметра, что привело к существенному увеличению числа струй при энергиях адронов  $E_a < 2$  ТэВ; 3) обработаны ливни с  $N_0 > 10^6$  с большим энергвыделением в калориметре, ранее

не рассматривавшиеся из-за трудностей разделения струй; 4) для струй адронов с энергией в калориметре  $\leq 1$  ТэВ учтена доля энергии, лежащая ниже порога регистрации. Для больших энергий эта доля несущественна. Полученные экспериментально в наших работах и работах других авторов /7,8,9,10/ пространственные распределения адронов с энергией  $> 0,5$  ТэВ в ливнях, образованных первичными частицами космических лучей с энергиями  $\geq 10^{14}$  эВ, оказываются существенно шире, чем по расчетам, проведенным по стандартным моделям взаимодействия. И наоборот, экспериментальные данные согласуются с расчетами /3,11/, в которых предполагается существенное увеличение перпендикулярного импульса частиц, образованных во взаимодействиях при сверхвысоких энергиях  $p_1$ . Более подробное обсуждение этого вопроса дано в наших статьях /3,5,6/, где приводятся аргументы в пользу предположения об увеличении среднего значения  $p_1$  при энергиях больше  $10^{14}$  эВ.

Поступила в редакцию  
7 июня 1978 г.

#### Л и т е р а т у р а

1. A. D. Erlykin, N. M. Nesterova et al., Proc. 9<sup>th</sup> ICRC (London), 2, 731 (1965).
2. Т. П. Аминева, В. С. Асейкин и др., Труды ФИАН, 46, 157 (1970).
3. В. А. Ромахин, Диссертация ФИАН, Москва, 1976 г.
4. Т. V. Danilova, N. V. Rabanova et al., Proc. 15<sup>th</sup> ICRC (Plovdiv), 8, 129 (1977).
5. N. M. Nesterova, V. A. Romakhin, V. G. Dubovij, Proc. 15<sup>th</sup> ICRC (Plovdiv), 8, 107 (1977); N. M. Nesterova, V. A. Romakhin, Proc. 15<sup>th</sup> ICRC (Plovdiv), 8, 113 (1977).
6. V. S. Aseikin, N. M. Nesterova et al., Proc. 14<sup>th</sup> ICRC (München), 8, 296 (1975).
7. H. Hasegawa, M. Noma et al., Proc. 9<sup>th</sup> ICRC (London), 2, 668 (1968).
8. B. K. Chatterjee et al., Canad. J. Phys., 46, 10, 136 (1968).

9. S. Miyake, K. Hinotani et al., *Acta Phys. Hung.*, 29, Suppl. 3, 451 (1970).
10. R. van Staa, B. Aschenbach, E. J. Böhm., *J. Phys. A.* 7, 1, 135 (1974).
11. J. Kempa., *Nuov. Cim.*, 31, 581 (1976).