

*И. П. Иваненко, Н. Л. Григоров, В. Я. Шестоперов, Ю. В. Басина, П. В. Вакулов, Ю. Я. Васильев, Р. М. Гольинская, Л. Б. Григорьева, Д. А. Журавлев, В. И. Зацепин, А. Е. Казакова, В. Д. Козлов, И. П. Кужан, Ю. А. Лапутин, Л. Г. Мищенко, В. М. Никаноров, Л. П. Папина, В. В. Платонов, Д. М. Подорожный, И. Д. Рапопорт, Г. А. Самсонов, Л. Г. Смоленский, В. А. Собиняков, В. Е. Соколов, Ф. В. Тамбовцев, Ч. А. Третьякова, Ю. В. Тригубов, И. М. Фатеева, Л. А. Хейн, Л. О. Чикова, В. Я. Ширяева, Б. М. Якозлез, И. В. Яшин*

## ЗАРЯДОВЫЙ СОСТАВ ЯДЕР ПЕРВИЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ С $z \geq 2$ В ОБЛАСТИ ЭНЕРГИЙ $\geq 2$ ТэВ

Изучение зарядового состава частиц высокой энергии первичного космического излучения — важная задача физики и астрофизики космических лучей. Проведенные до последнего времени исследования прояснили ситуацию в области энергии частиц 1–10 ГэВ/нуклон [1]. В области более высоких энергий этот вопрос остается открытым [2].

На ИСЗ «Космос-1543» в 1984 г. с помощью прибора «Сокол» был проведен эксперимент по изучению частиц космических лучей с энергией  $\geq 1$  ТэВ. Энергия частиц измерялась с помощью ионизационного калориметра, заряд частиц измерялся расположенными над ним черенковскими детекторами двух типов (ДЗ-1 и ДЗ-2).

Верхний детектор ДЗ-2 состоял из четырех независимо работающих счетчиков из плексигласа толщиной в 1 см. Они перекрывали телесный угол прибора и служили для измерения зарядов в области  $5 \leq z \leq 50$ . Под ним были расположены 11 счетчиков направленного действия из плексигласа толщиной 5 см. Они образовывали блок детектора ДЗ-1, предназначенный для измерения зарядов в области  $1 \leq z \leq 5$ . Каждый из них работал автономно. Все вместе они перекрывали  $\sim 3/4$  площади детектора ДЗ-2. Благодаря большому числу детекторов ионизации в калориметре (80 сцинтилляторов на 10 уровнях) имелась возможность для каждой первичной частицы восстановить положение лавины частиц, определить координаты входа частицы в прибор и угол между направлением прихода частицы и продольной осью прибора. Подробное описание прибора и системы отбора событий приведены в [3, 4].

Эта информация позволила отобрать частицы, идущие в пределах телесного угла прибора и внести поправку, связанную с углом прихода частицы, в показания детектора ДЗ-2. В показаниях детекторов заряда ДЗ-1 и ДЗ-2 была также внесена поправка, связанная с некоторым различием чувствительности отдельных счетчиков.

Полученные результаты показали, что в детекторах ДЗ-1 протоны и  $\alpha$ -частицы разделяются достаточно надежно. Доля  $\alpha$ -частиц среди зарегистрированных протонов, так же как и протонов среди  $\alpha$ -частиц, не превышает нескольких процентов.

Чтобы получить разделение по  $z$  детектором ДЗ-2, из всего массива данных были отобраны частицы с энергией от 1 до 10 ТэВ, проходящие через оба черенковских детектора. Были исключены частицы, проходящие через четыре счетчика ДЗ-1, которые находились вблизи ФЭУ, просматривающих четыре счетчика ДЗ-2. Это связано с тем, что при прохождении через указанные счетчики ДЗ-1, частица могла задевать фотокатоды ФЭУ ДЗ-2 и тем самым искажать в них амплитуду импульса.

Было отобрано 284 частицы с  $5 \leq z \leq 15$ , 17 частиц с  $16 \leq z \leq 21$  и 94 частицы с  $21 < z \leq 30$ . После этого было определено число частиц  $\Delta N$ , приходящихся на интервал заряда  $\Delta z$ , равный 0,4 для области  $z \leq 15$  и 0,5 для области  $z > 15$ . Полученное распределение для  $z \geq 5$  приведено на рис. 1. На том же рисунке сплошной кривой представлено ожидаемое распределение по  $z$  ядер с одинаковой энергией на ядро, рассчитанное при следующих условиях. Во-первых, относительная распространенность частиц с разным  $z$  была принята такой же, как и при энергии  $\sim 1$  ГэВ/нуклон [5]. При пересчете от энергии на нуклон к энергии на ядро предполагалось, что дифференциальные энергетические спектры всех ядер имеют степенной вид с одинаковым показателем степени  $\gamma = 2,6$ . Во-вторых, ошибки измерения зарядов имеют нормальное распределение с  $\sigma = \sqrt{9 \cdot 10^{-2} + 1,6 \cdot 10^{-3} z^2}$ . Первый член обусловлен пуассоновым распределением числа фотоэлектронов. Он не зависит от  $z$  и по проведенным калибровочным измерениям на ускорителе на ядрах углерода ( $z=6$ ) равен 0,3 единицы заряда. Второй член обусловлен неоднородностью сбора света в счетчиках, которая по лабораторным измерениям составляет 4% для ядер с любыми значениями  $z$ .

Чтобы сравнить рассчитанное распределение с экспериментальными данными, площадь под кривой в интервале  $5 \leq z \leq 15$  была приравнена числу зарегистрированных частиц в этой области зарядов. Согласие экспериментальных данных с расчетной кривой характеризуется значениями  $\chi^2 = 14,2$  при степенях свободы  $\nu = 24$  для области  $5 \leq z \leq 15$  и  $\chi^2 = 10,7$  при  $\nu = 11$  для области  $z < 21$ . Поэтому уже из рис. 1

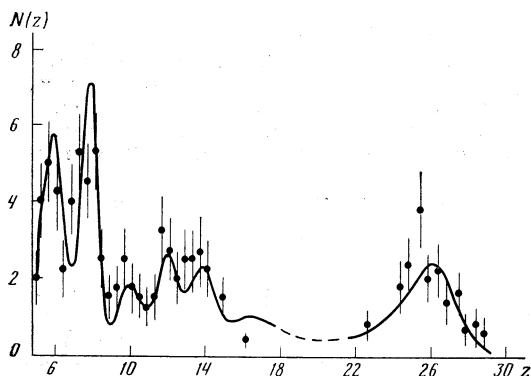


Рис. 1

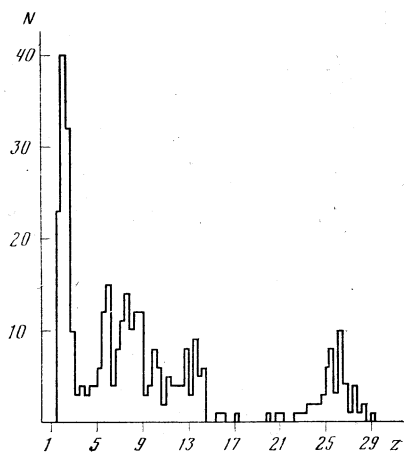


Рис. 2

Рис. 1. Экспериментальное зарядовое распределение ядер с  $z > 5$  для энергетического интервала 1-10 ТэВ

Рис. 2. Экспериментальное зарядовое распределение ядер с  $z \geq 2$  для энергии  $\geq 2$  ТэВ

следует, что в области энергий частиц 1-10 ТэВ относительная распространенность ядер с  $z \geq 5$  близка к той, которая наблюдается при энергиях  $\sim 1$  ГэВ/нуклон.

Для ядер с  $z \geq 2$  влияние радиотехнического порога прибора перестает сказываться при энергии  $\approx 2$  ТэВ, где получаемые энергетические спектры этих ядер выходят на степенной закон. Поэтому для более корректного определения зарядового состава были использованы ядра с энергией свыше 2 ТэВ, проходящие в пределах телесного угла установки и пересекающие оба черенковских детектора, за исключением тех, которые проходят через указанные выше четыре счетчика ДЗ-1. Далее на отобранные события были наложены следующие ограничения. Если индексом  $u$   $z$  обозначить детектор, которым проводится измерение заряда (например,  $z_2$  — результат измерения детектором ДЗ-2), то для ядер группы М ( $5 < z_2 \leq 9$ ) — требовалось  $z_1 > 2$ . Соответственно для ядер группы Н ( $9 < z_2 < 20$ ) —  $z_1 > 3$ , для группы ВН ( $21 \leq z_2 \leq 30$ ) необходимо  $z_1 > 4$ . К  $\alpha$ -частицам относились события с  $1,6 \leq z_1 \leq 3,0$  при  $z_2 < 4$ . Эти дополнительные критерии связаны с методическими особенностями эксперимента и слабо влияют на окончательный результат. Полученное при указанном отборе распределение событий по зарядам ( $\Delta z = 0,4$ ) приведено на рис. 2.

Группа ядер	Число событий	Число ядер	Нормированное число ядер, %	По данным [7]	По данным [8]
$\alpha$	95	196	$172 \pm 26$	$\sim 220$	$239 \pm 5$
М	104	114	100	100	100
Н	76	87	$76 \pm 11$	$77 \pm 5$	$73 \pm 1$
ВН	53	66	$58 \pm 10$	$66 \pm 7$	$59 \pm 2$

Для увеличения статистического материала ядра с близкими значениями  $z$  были объединены в группы ( $\alpha$ , М, Н и ВН), как указано выше. В таблице приведено число зарегистрированных событий для каждой группы. Эти данные требуют введения ряда поправок. Для  $\alpha$ -частиц была учтена эффективность регистрации и взаимодействия в веществе над прибором и плексиглазе детекторов ДЗ-1 и ДЗ-2. Для групп М, Н и ВН учитывались только взаимодействия в веществе над прибором и плексиглазе детектора ДЗ-2 — в 2 г/см<sup>2</sup> А1 и 1,2 г/см<sup>2</sup> легкого вещества соответственно. Пробеги для неупругого взаимодействия ядер были взяты из работы [6]. Кроме того, было учтено, что, из-за ошибок измерения заряда около 4% ядер, отнесенных к группе М, в действительности являются ядрами атомов бора. Число ядер в каждой группе после введения поправок на указанные эффекты приведено в третьем столбце таблицы. В четвертом столбце эти же данные нормированы к числу ядер группы М.

В двух последних столбцах таблицы приведены нормированные к группе М данные, представленные в работах [7] и [8], полученные при энергиях  $> 4$  и  $> 3$  ГэВ/нуклон соответственно. Данные этих работ были пересчитаны к энергии на ядро в предположении степенного энергетического спектра с показателями  $\gamma = 2,6$  для всех ядер (независимо от  $z$ ) и объединены по зарядовым группам. Эти данные относятся к энергии  $\approx 15-20$  ТэВ для ядер атомов гелия и  $\approx 200-250$  ТэВ для ядер

атомов железа, что на один-два порядка ниже, чем в настоящем эксперименте. Как видно из таблицы, при переходе к энергиям  $\geq 2$  ТэВ зарядовый состав первичных ядер космических лучей с  $z \geq 2$  не претерпевает существенных изменений.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Juliusson E.* Composition of cosmic rays // Proc. 18 ICRC. 1983. V. 12. P. 117.
2. *Linsley J.* Spectra, anisotropies and composition of cosmic rays above 1000 GeV // Proc. 18 ICRC. 1983. V. 12. P. 135.
3. *Vernov S. N. et al.* Device for investigation of high energy cosmic rays // Proc. 17 ICRC. 1981. V. 8. P. 49.
4. *Vernov S. N. et al.* Charge composition and energy spectrum of cosmic ray primary particles for energies higher than 1 TeV // Proc. 19 ICRC. 1985. V. 2. P. 52.
5. *Garcia-Munoz, Simpson J. A.* The elemental abundances of Hydrogen through Nickel in the low energy galactic cosmic rays // Proc. 16 ICRC. 1979. V. 1. P. 270.
6. *Simon M. et al.* Energy spectra of cosmic ray nuclei to above 100 GeV per nucleon // Astrophys. J. 1980. V. 239. № 2. Pt. 1. P. 712.
7. *Лонгейр М.* Астрофизика высоких энергий. М., 1984.
8. *Lezniak J. A., Webber W. R.* The charge composition and energy spectra of cosmic ray nuclei from 300 MeV per nucleon to 500 GeV per nucleon // Astrophys. J. 1978. V. 233. № 2. Pt. 1. P. 676.

Поступила в редакцию  
17.VI.1986

УДК 650.388.2

*И. В. Гецелев, Г. А. Тимофеев, Ю. И. Губарь,  
В. А. Кузнецова, А. Р. Мозжухина*

## ПОТОКИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ НА ТРАЕКТОРИЯХ ИСЗ

В настоящей работе использовался вероятностный метод описания траектории, заключающийся в нахождении вероятности  $m_{ij}$  пребывания спутника в элементарных ячейках  $\tau_{ij}$ , на которые разбивается  $L, B$ -пространство. Вероятность  $m_{ij}$  находится как отношение времени  $t_{ij}$  пребывания спутника в ячейке к полному времени полета  $t_{\text{пол}}$ .

Экспериментальные данные по потокам заряженных частиц также представляются в  $L, B$ -координатах. Затем по известной интенсивности радиации  $I_{ij}$  в ячейке  $\tau_{ij}$   $L, B$ -пространства средняя интенсивность на траектории спутника находится по формуле

$$\bar{I} = \sum_{ij} m_{ij} I_{ij}.$$

Расчеты проводились по программам, составленным для:

Расчета вероятностей пребывания спутника с заданными начальными параметрами орбиты в различных ячейках  $L, B$ -пространства  $m_{ij}$ ; интерполяции пространственно-энергетического распределения потоков заряженных частиц на интересующие нас энергии и координаты  $L, B$ ; расчета средних потоков на орбитах ИСЗ с заданными параметрами под заданными защитами.

Энергии, для которых находятся пространственно-энергетические распределения заряженных частиц, определяются в соответствии с толщинами защиты.

Предложенный метод весьма экономичен — в среднем время расчета потоков для широкого набора защит (на ЭВМ ЕС-1040) не превышает 10 мин. Отметим, что расчеты могут быть проведены заблаговременно, до начала полета спутника. Используемые распределения интенсивности заряженных частиц можно корректировать, если происходят изменения в их пространственно-энергетическом распределении.

В настоящей работе использовались усредненные экспериментальные данные, полученные на основании [1–4].

Нами были рассчитаны потоки протонов и электронов под защитой из алюминия толщиной  $X=0,01; 0,15; 0,5; 1,0; 3,0$  г/см<sup>2</sup> для большого числа орбит (~1000). В таблице приведены результаты расчета потоков на ряде орбит ИСЗ под защитой из алюминия толщиной 0,5 г/см<sup>2</sup>, соответствующей энергиям протонов  $E_p > 20$  МэВ и электронов  $E_e > 1$  МэВ, проникающих через данную защиту.

Орбита спутника полностью определена, если заданы следующие ее параметры:  $h_a$  — высота апогея;  $h_n$  — высота перигея;  $i$  — угол наклона плоскости орбиты к плоскости геоэкватора;  $\omega$  — аргумент перигея;  $\lambda$  — долгота восходящего узла. В зависимости от величин указанных параметров траектория ИСЗ проходит через области околоземного космического пространства, которые могут существенно различаться по физическим свойствам, например по составу и интенсивности потоков заряжен-