

4. Кондратьев В. А., Олейник О. А. // Успехи матем. наук. 1983. 38, № 2. С. 3.
5. Свешников А. Г. // ДАН СССР. 1950. 73, № 5. С. 917.
6. Миттра Р., Ли С. В. Аналитические методы теории волноводов. М., 1974.
7. Meixner J. // IEEE Trans. Antennas Propag. 1972. AP-20, N 4. P. 442.
8. Ладыженская О. А., Уральцева Н. Н. Линейные и квазилинейные уравнения эллиптического типа. М., 1973.
9. Крейн С. Г. Линейные уравнения в банаховом пространстве. М., 1967.
10. Ильинский А. С., Кравцов В. В., Свешников А. Г. Математические модели электродинамики. М., 1991.
11. Подлипенко Ю. К. О краевых задачах для уравнения Гельмгольца в клине: Препр. Ин-та математики АН Украины № 91-47. Киев, 1991.

Поступила в редакцию
16.05.94

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3, ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1995. Т. 36, № 2

АТОМНАЯ И ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

УДК 523.165

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СПЕКТР ПЕРВИЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ С ЭНЕРГИЕЙ 100—2000 ТэВ ПО ДАННЫМ УСТАНОВКИ ТАСТ

Р. А. Антонов, А. М. Анохина, В. И. Галкин, Е. Е. Коростелева,
Л. А. Кузьмичев, К. В. Мандрицкая, Е. А. Петрова, Т. М. Роганова,
Г. А. Самсонов, В. Ткачек

(НИИЯФ)

На установке, регистрирующей черенковское излучение широких атмосферных ливней получены данные об интенсивности и форме энергетического спектра первичных космических лучей в диапазоне энергий 10^{14} — 10^{15} эВ.

В связи с интенсивным развитием гамма-астрономии сверхвысоких энергий в последние годы появился целый ряд экспериментальных установок, которые регистрируют черенковское излучение, генерируемое в атмосфере широкими атмосферными ливнями (ШАЛ). ШАЛ являются продуктом взаимодействия первичных космических лучей (ПКЛ) с атмосферой Земли, и их изучение позволяет восстановить некоторые характеристики первичных частиц, в первую очередь энергию и направление прихода. Поскольку гамма-кванты электрически нейтральны, их траектория не искривляется межзвездными магнитными полями и непосредственно указывает на объект — источник квантов. Это свойство главным образом используется для поиска дискретных гамма-источников: об их наличии судят по превышению количества ШАЛ, приходящих с какого-либо направления, над изотропным фоном, обусловленным заряженными частицами ПКЛ. Другие параметры ШАЛ, зависящие от природы первичной частицы, используются для повышения статистической надежности выделения ливней, генерируемых гамма-квантами.

Описываемая ниже установка ТАСТ (Thian Shan Atmospheric Cherenkov Telescope) создана на Тянь-Шане (Казахстан) на высоте 3300 м над уровнем моря и состоит из шести детекторов черенковского излучения, расположенных равномерно по окружности радиусом 115 м. Каждый из детекторов представляет собой прожекторную установку с параболическим зеркалом диаметром 1,5 м, в фокусе которого смонтирован фотоумножитель ФЭУ-49. Условие срабатывания установки —

наличие в каждом из шести детекторов импульса, превышающего заданный порог. С помощью наносекундной техники анализируется разница времен прихода фронта черенковских фотонов от ШАЛ в различных пунктах, а также измеряется число фотонов, зарегистрированных каждым пунктом. Совокупность этих данных позволяет с высокой точностью определить направление прихода, положение оси ливня и энергию первичной частицы. Аппаратура сбора и накопления экспериментальных данных выполнена в стандарте SAMAC под управлением персонального компьютера. Ее схема представлена в [1].

Проведенные в 1993 г. методические измерения позволили проверить стабильность работы аппаратуры и возможность правильного определения параметров индивидуальных ливней, а также измерить энергетический спектр заряженных частиц ПКЛ. В данной работе мы рассмотрим результаты измерений этого спектра, которые, являясь побочным продуктом гамма-астрономических исследований, представляют значительный самостоятельный интерес в свете дискуссий о форме энергетического спектра ПКЛ.

В приведенном ниже материале использовано 377 событий, зарегистрированных при условии шестикратного совпадения, т. е. срабатывания всех шести пунктов установки.

На рис. 1 приведено угловое распределение зарегистрированных

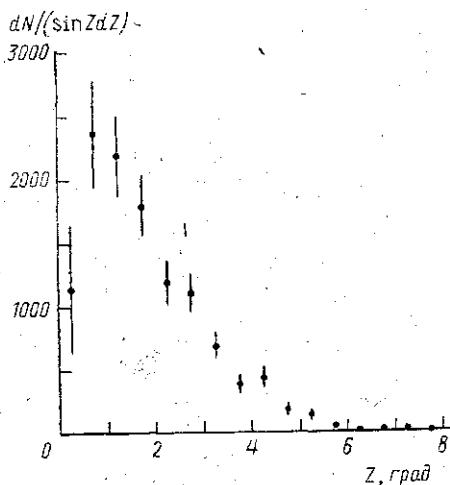


Рис. 1. Угловое распределение зарегистрированных ливней, Z — зенитный угол (в градусах)

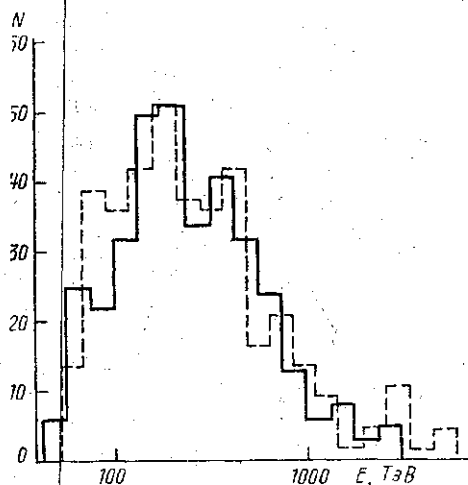


Рис. 2. Энергетические распределения зарегистрированных в эксперименте (сплошная линия) и моделированных (штриховая) событий

ливней. Эффективный зенитный угол для этого распределения $2,75^\circ$ соответствует эффективному телесному углу установки $0,00724$ ср. Точность измерения временных интервалов в данном эксперименте составила ~ 5 нс, что соответствует угловому разрешению $\sim 0,5^\circ$.

Пороговая величина измеряемого черенковского импульса (в числе фотоэлектронов) выбиралась так, чтобы приблизительно на порядок превысить величину импульсов, обусловленных флуктуациями засветки от звезд. Теоретическая оценка величины звездного фона для установки TAST составляет $\sim 2 \cdot 10^9$ фотоэлектрон/с. В процессе эксперимента был выбран порог ~ 270 фотоэлектронов. Эта величина соответствует энергии ядер ПКЛ ~ 40 ТэВ (для первичного гамма-кванта).

~20 ТэВ). В настоящее время производится замена фотоумножителей ФЭУ-49 на фотоприемники «Квазар» [2], имеющие лучшие временные характеристики, а также модернизация электронных измерительных каналов. Это позволит в несколько раз снизить энергетический порог и улучшить угловое разрешение установки.

Для перехода от зарегистрированного числа фотонов к энергии первичной частицы был проведен цикл расчетов, основные принципы которого содержатся в [3]. Результаты расчетов показали, что для установки ТАСТ связь полного числа черенковских фотонов в интервале длин волн 300—800 нм в интервале энергий 100—1000 ТэВ описывается выражением

$$Q/E = 1,4 \cdot 10^7 \text{ квант/ТэВ.}$$

Данная формула справедлива с точностью до нескольких процентов при любом зарядовом составе ПКЛ: от чисто протонного до включающего только ядра железа.

С целью контроля эффективности алгоритма обработки экспериментальных данных была проведена обработка банка искусственных событий, моделированных методом Монте-Карло. На рис. 2 приведены распределения по энергии для зарегистрированных и моделированных событий. Гистограмма моделированных событий, полученная в предположении величины порога 270 фотоэлектронов, демонстрирует удовлетворительное согласие с экспериментальной гистограммой. В рамках обработки банка искусственных событий была получена оценка точности измерения энергии в индивидуальном событии, которая составила около 30% во всем диапазоне энергий 100—1000 ТэВ.

Для получения неискаженного спектра ПКЛ необходимо включить в обработку только события с параметрами, для которых эффективность регистрации близка к 100%. Эффективность регистрации зависит от расстояния между осью ливня и центром установки и энергии первичной частицы. Для оценки эффективности были построены дифференциальные энергетические спектры ливней, оси которых попадают в круги радиусом 30, 60, 90 и 120 м (рис. 3). Для каждого из этих кругов существует энергия, начиная с которой спектр становится степенным. Для каждого из кругов, начиная с наибольшего, отбирались события в интервалах, лежащих на степенном спектре. Итоговая выборка составила 213 событий. На рис. 4 построенный таким образом дифференциальный энергетический спектр ПКЛ в диапазоне энергий 100—2000 ТэВ сопоставлен с некоторыми данными других авторов [4—7]. Показатели наклона спектра для интервалов 100—2000, 200—

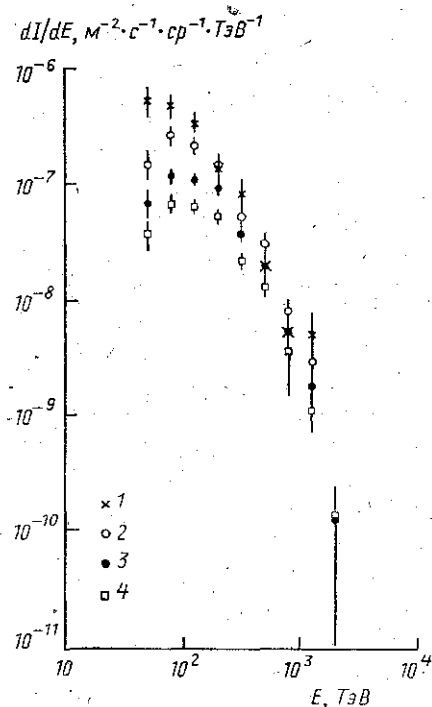


Рис. 3. Дифференциальные энергетические спектры событий, зарегистрированных в круге радиуса $R=30$ (1), 60 (2), 90 (3) и 120 м (4)

2000 и 200—1500 ТэВ составляют $2,60 \pm 0,11$, $2,69 \pm 0,12$ и $2,64 \pm 0,12$ соответственно (указаны только статистические ошибки измерения показателей).

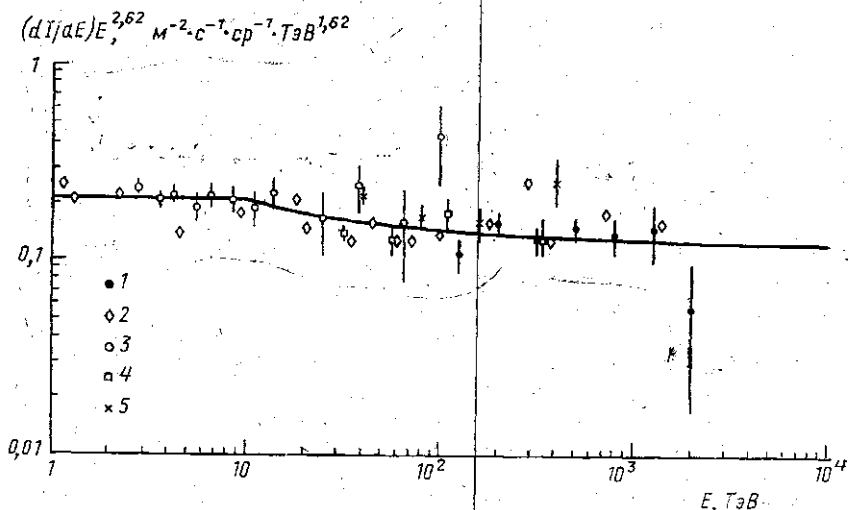


Рис. 4. Дифференциальный энергетический спектр ПКЛ: 1 — настоящий эксперимент, 2 — [4], 3 — [5], 4 — [6], 5 — [7].

Уточнение спектра ПКЛ при энергиях 10^{12} — 10^{15} эВ является в настоящее время актуальной задачей в связи с проблемой возможного укрупнения спектра протонов в области 1—100 ТэВ [6—8]. В этом случае спектр всех частиц должен также иметь характерную особенность в виде «ступени», параметры которой зависят от характера укрупнения протонного спектра. Сплошная кривая на рис. 4 иллюстрирует вид «ступени» при увеличении показателя наклона спектра протонов на 0,6, начиная с 10 ТэВ. Имеющиеся в настоящее время в этой области энергий данные не позволяют сделать определенные выводы. Необходимо повысить статистическую точность и, что особенно существенно, провести измерения в диапазоне от нескольких до ~ 1000 ТэВ одной установкой, имеющей достаточно высокое энергетическое разрешение. При понижении энергетического порога установки ТАСТ до нескольких ТэВ можно пытаться решить проблему особенностей в спектре ПКЛ в диапазоне 1—1000 ТэВ. Требуемое время наблюдения при этом составляет 20—30 ч. С другой стороны, при более длительных наблюдениях установка позволяет также уточнить данные об изломе в спектре ПКЛ при энергии $\sim 3 \cdot 10^{15}$ эВ.

Использованный в настоящей работе метод определения энергии первичной частицы путем регистрации интегрального потока черенковского света ШАЛ является наиболее адекватным, так как регистрируемая величина жестко связана с суммарными ионизационными потерями частиц ШАЛ в атмосфере, которые в свою очередь составляют $\sim 70\%$ от энергии первичной частицы. Ранее такой метод в указанном диапазоне энергий не использовался.

ЛИТЕРАТУРА

1. Антонов Р. А., Анохина А. М., Галкин В. И. и др. // Изв. АН, сер. физ. 1993. 57, № 4. С. 177.
2. Антонов Р. А., Галкин В. И., Иваненко И. П. и др. // Там же. С. 181.

3. Anokhina A. M., Galkin V. I., Mandritskaya K. V., Roganova T. M. // *Astrophys. Space Sci.* 1993. 209. P. 19.

4. Григоров Н. Л., Рапопорт И. Д., Шестоперов В. Я. Частицы высоких энергий в космических лучах. М., 1973.

5. Иваненко И. П., Рапопорт И. Д., Шестоперов В. Я. и др. // *Письма в ЖЭТФ.* 1989. 49, № 4. С. 192.

6. Зацепин В. И., Лазарева Т. В., Сажина Г. П., Сокольская Н. В. // *Ядерная физика.* 1994. 57. С. 684.

7. Asakimori K., Burnett T. H., Cherry M. L. et al. // *Proc. 22 ICRC.* Dublin, 1991. V. I. P. 57.

8. Григоров Н. Л., Нестеров В. Е., Рапопорт И. Д. и др. // *Ядерная физика.* 1970. 11. С. 1058.

Поступила в редакцию
23.03.94

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3, ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1995. Т. 36, № 2

РАДИОФИЗИКА

УДК 533.9.038

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО ТОКА ЭЛЕКТРОНОВ НА СФЕРИЧЕСКИЙ ЗОНД ПРИ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ДАВЛЕНИЯХ

А. П. Ершов, И. Г. Оводов

(кафедра физической электроники)

Методом Монте-Карло выполнены расчеты электронного тока на сферический зонд в широком диапазоне соотношений между длиной свободного пробега электронов, радиусом зонда и дебаевским радиусом. Проведено сравнение численных расчетов с результатами вычислений по известным аналитическим формулам. Найдены погрешности определения температуры электронов и пределы, до которых возможно пренебрежение влиянием толщины слоя пространственного заряда при описании электронной ветви ВАХ.

1. Введение

В классической теории ленгмюровского зонда, описывающей предельный случай

$$\lambda \gg a, \lambda \gg r_d, \quad (1)$$

связь между функцией распределения электронов по энергиям (ФРЭЭ) $f_0(\epsilon)$ в невозмущенной изотропной плазме и плотностью электронного тока j на выпуклый зонд, находящийся под потенциалом отталкивания V относительно плазмы, описывается интегральным соотношением

$$j(V) = \frac{2\pi en}{m^2} \int_{eV}^{\infty} (\epsilon - eV) f_0(\epsilon) d\epsilon. \quad (2)$$

В (1), (2) λ , a , r_d — длина свободного пробега электронов, радиус зонда и электронный дебаевский радиус соответственно, e , m — заряд и масса электрона, n — концентрация электронов в невозмущенной плазме, а ФРЭЭ нормирована условием

$$\int_0^{\infty} \epsilon^{1/2} f_0(\epsilon) d\epsilon = 1.$$