

## ОБРАБОТКА ДАННЫХ СПЕКТРОМЕТРА ПАМЕЛА

Ю. И. Стожков, С. В. Викторов, А. А. Квашнин,  
А. Н. Квашнин, В. И. Логачев

*Международный космический эксперимент ПАМЕЛА был начат в середине 2006 г. и закончился в начале 2016 г. Основная задача эксперимента – изучение спектров и элементного состава космических лучей (в т.ч. спектров антипротонов и позитронов) в широкой области энергий. Основным инструментом прибора ПАМЕЛА является спектрометр, который включает в себя несколько детекторов. Т.к. в настоящей статье речь пойдет о методике обработки результатов спектрометра, полученных для частиц высоких энергий (протоны,  $\alpha$ -частицы с энергией  $E \geq 50$  ГэВ/нуклон, электроны и позитроны с  $E \geq 50$  ГэВ), то при обработке данных в основном использовались 3 детектора: трекер, помещенный в постоянное магнитное поле, калориметр и нейтронный детектор. Изложена достаточно простая методика выделения электронов и позитронов из общего потока заряженных частиц, попадающих в спектрометр, методика определения энергии этих частиц и получения их энергетических спектров. Настоящая статья опирается на результаты, представленные в [1].*

**Ключевые слова:** космические лучи, протоны, нейтроны, электроны и позитроны, энергетический спектр.

*Введение.* Спектрометр ПАМЕЛА (PAMELA – A Payload for Antimatter Matter Exploration and Light-nuclei Astrophysics) был выведен на околоземную эллиптическую орбиту высотой 350–610 км 15 июня 2006 г. и успешно работал до начала 2016 г. Спектрометр предназначен для исследования спектров и элементного состава космических

лучей (протонов и антипротонов, электронов и позитронов, также лёгких ядер), начиная со сравнительно малых энергий до энергий порядка нескольких ТэВ (см. табл. 1).

Геометрический фактор прибора ПАМЕЛА равен  $21.6 \text{ см}^2 \cdot \text{ср}$ . Более подробное описание как всего прибора ПАМЕЛА в целом, так и его отдельных детекторов приведены в [1].

В статье мы используем в основном данные 3 детекторов спектрометра:

(1) Трекер включает в себя 6 двухслойных кремниевых детекторов. На обе стороны каждого детектора нанесены металлические полоски (стрипы). Наличие скрещенных стрипов на кремниевых детекторах позволяет определять точку прохождения частицы с точностью не хуже  $\sim 3 \text{ мкм}$  по одной координате и  $\sim 15 \text{ мкм}$  по другой. Трекер помещен в постоянное магнитное поле напряженностью  $\sim 0.48 \text{ Тл}$ . По измерению кривизны траектории частицы в магнитном поле восстанавливается жёсткость частицы  $R (R = pc/Ze, \text{ где } p - \text{ импульс частицы, } c - \text{ скорость света, } Z - \text{ заряд частицы и } e - \text{ заряд электрона})$ ;

(2) Под трекером находится калориметр, который состоит из 44-х слоев кремниевых стриповых детекторов (чередующиеся слои имеют взаимно-перпендикулярные направления стрипов). Стрипы отстоят друг от друга на расстоянии  $0.1 \text{ мм}$ , ширина стрипа –  $2.4 \text{ мм}$ . После каждых 2 слоев детекторов находится лист вольфрама толщиной  $2.6 \text{ мм}$ . Полная толщина калориметра составляет  $16.3$  радиационные единицы или  $0.6$  ядерного пробега до взаимодействия протона. При взаимодействии частицы с веществом калориметра в последнем образуется каскад частиц, характеристики которого зависят от вида взаимодействовавшей частицы;

(3) Под калориметром расположен детектор нейтронов (НД). Этот детектор состоит из 18 счетчиков, заполненных газом  $^3\text{He}$  при давлении 8 атмосфер. НД предназначен для регистрации тепловых нейтронов (с энергией  $\sim 0.025 \text{ эВ}$ ). В каскадах калориметра в результате взаимодействия протонов или ядер с ядром вольфрама ( $W$ ) образуются испарительные нейтроны со средней энергией  $\sim 3 \text{ МэВ}$ . Для замедления этих нейтронов до тепловых энергий используются полиэтиленовые пластины, которые поставлены сверху и снизу гелиевых счетчиков.

Т а б л и ц а 1

*Энергетические интервалы частиц, исследуемых спектрометром ПАМЕЛА*

Частицы	Энергия
Протоны	80 МэВ – 1000 ГэВ
Антипротоны	80 МэВ – 200 ГэВ
Электроны и позитроны	50 МэВ – 2 ТэВ
Легкие ядра (заряд $Z \leq 6$ )	100 МэВ/н – 700 ГэВ/н

Регистрация нейтронов, образованных в каскадах калориметра, позволяет существенно улучшить разделение событий, вызванных ядерно-активными частицами и лептонами. Известно, что электроны в первичных космических лучах составляют малую долю от полного потока заряженных частиц ( $\sim 1\%$  в области энергий сотни ГэВ и  $\sim 0.1\%$  в области энергий  $\sim 1$  ТэВ). В каскадах, образованных в калориметре электронами (позитронами), практически отсутствуют нейтроны [2]. Наоборот, каскады от протонов содержат значительное количество испарительных нейтронов [3].

*Экспериментальные данные.* На рис. 1–4 показаны траектории частиц в трекаре и каскады в калориметре, а также формы каскадных кривых в калориметре, образованных в результате взаимодействий высокоэнергичных частиц с ядром или атомом вольфрама.

Каскадная кривая в калориметре достаточно хорошо описывается выражением

$$Q(x) = Q_0 \cdot \exp[-2 \cdot (x - p_0)^2 / d \cdot (x + k \cdot p_0)], \quad (1)$$

где  $Q_0$  – максимум энерговыделения в одном из слоев калориметра,  $p_0$  – положение максимума,  $x$  – номер слоя,  $k$  и  $d$  – коэффициенты аппроксимации, подбираемые методом наименьших квадратов. Эта формула была получена эмпирическим путем и проверена на экспериментальных и расчетных данных в широком диапазоне энергий. Экспериментальные данные были получены на электронном пучке ускорителя при калибровке спектрометра ПАМЕЛА в ЦЕРНе. Приведенная формула хорошо описывает эксперимент и расчет. При ее выводе использовалось выражение из работы [4].

*Определение энергии частиц.* Энергия частицы определяется из площади под каскадной кривой, которая аппроксимируется выражением, приведенным выше. Из анализа данных экспериментов АТИК, ФЕРМИ, АМС-02, ПАМЕЛА следует, что энерговыделение в тонком калориметре (толщина менее 2 ядерных пробегов) пропорционально энергии частицы (для электронов и позитронов, протонов и  $\alpha$ -частиц). В эксперименте ПАМЕЛА из сопоставления данных магнитного спектрометра и калориметра были

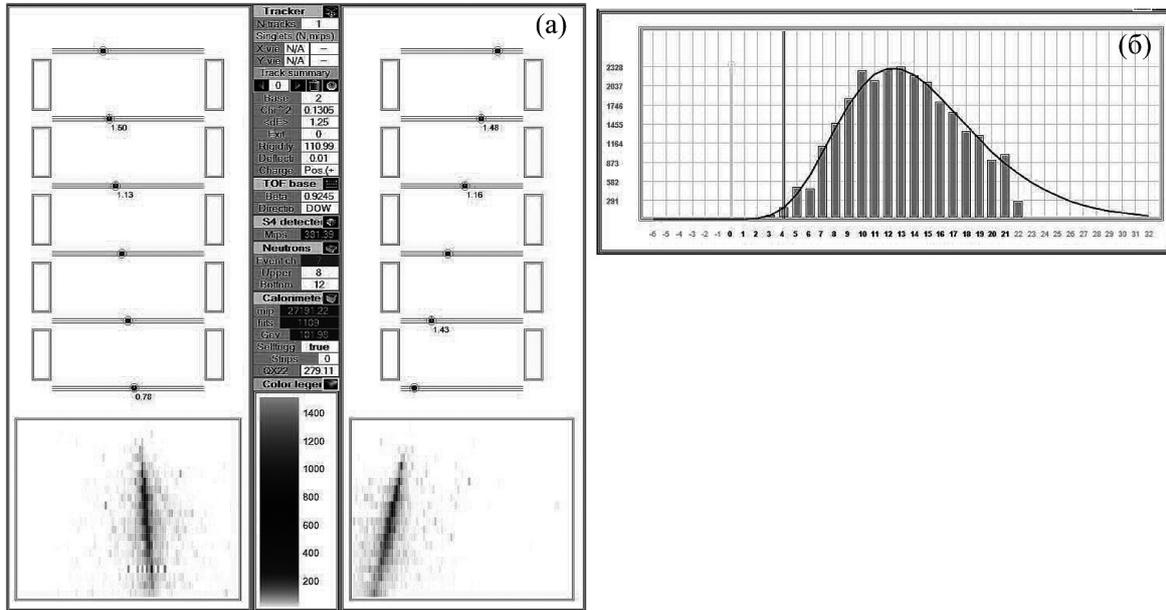


Рис. 1: (а) Протон с  $E = 630$  ГэВ проходит через трекер (верхняя часть рис. 1(а)) и дает каскад в калориметре (нижняя часть рис. 1(а)). Горизонтальные линии изображают пластины стриповых кремниевых детекторов (6 детекторов со стрипами вдоль оси  $X$  и 6 детекторов вдоль оси  $Y$ ). Точками отмечена траектория частицы, а числа показывают ее ионизационные потери в детекторе в единицах потерь однозарядной релятивистской частицы (*minimum ionizing particle* – *mip*, русское правописание – *мип*). (б) Каскадная кривая, образованная в калориметре протоном с  $E \approx 630$  ГэВ. Гистограмма показывает величину энергосвечения в *mip* (по оси ординат) в каждом слое калориметра (номер слоя – по оси абсцисс), а огибающая кривая – аппроксимация, рассчитанная по формуле (1). НД зарегистрировал 7 нейтронов. Вертикальная прямая слева обозначает начало каскада в калориметре.

определены соотношения между жесткостью (энергией) частицы по данным трекера и площадью под каскадной кривой в калориметре  $Q_{\text{int}} = k \cdot R$  (или  $Q_{\text{int}} = k_1 \cdot E$ ). Было найдено, что в среднем значения коэффициентов  $k$  составляют для электронов (позитронов)  $k_{1e} = (276 \pm 30)$  мип/ГэВ, для протонов  $k_{1p} = (96 \pm 20)$  мип/ГэВ, для  $\alpha$ -частиц  $k_{1\alpha} = (355 \pm 70)$  мип/ГэВ или  $k_{\alpha} = (174 \pm 30)$  мип/ГВ. При выводе значений коэффициентов  $k$  анализировались каскадные кривые, которые практически целиком находились внутри калориметра. Неточность в определении энергии частицы по площади под каскадной кривой в калориметре определяется, в основном, ошибкой в величине коэффициента  $k$ .

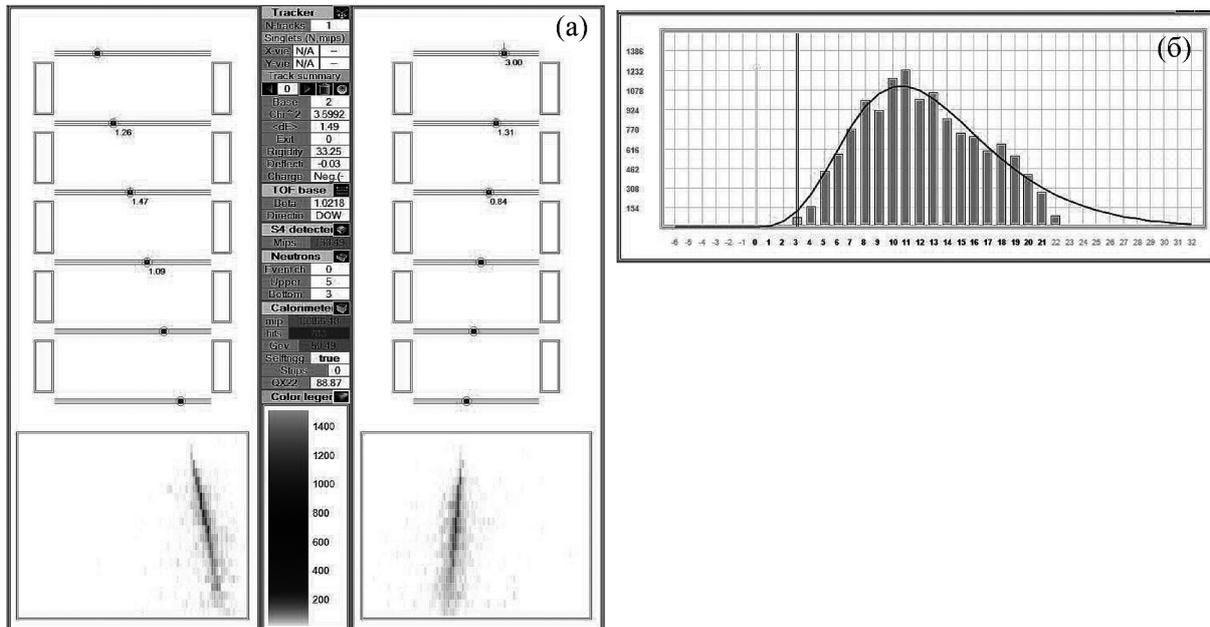


Рис. 2: (а) То же самое, что и на рис. 1(а), но для электрона, который проходит через трекер и калориметр. (б) То же самое, что и на рис. 1(б), но для электрона с  $E \approx 110$  ГэВ. Огибающая кривая – расчет каскадной кривой по формуле (1). НД не зарегистрировал ни одного нейтрона.

*Выделение электронов.* Ниже изложен достаточно простой метод выделения электронов и позитронов из полного потока заряженных частиц первичного космического излучения. Метод включает в себя несколько последовательных шагов.

*Шаг 1.* Из полного потока заряженных частиц с помощью данных трекера выделяются однозарядные частицы. Как показано в [5], эффективность такого выделения очень высокая.

*Шаг 2.* В калориметре все электроны взаимодействуют в первых 4-х слоях вольфрама (толщина 4-х слоев составляет  $2.96X_0$ , где  $X_0$  – радиационная единица, которая в вольфраме равна  $6.76 \text{ г/см}^2$  или  $0.35 \text{ см}$ ) и дают электромагнитные каскады. Для выделения таких событий ставится условие, чтобы число частиц в первых 4 слоях вольфрама составляло не менее 25 мипов.

Кроме каскадов в калориметре от электронов и позитронов с началом в первых 4-х слоях, часть каскадов будет образована протонами. Из полного потока протонов  $N_p$ , падающих на калориметр, в первых 4-х слоях калориметра будут взаимодействовать  $N_p(\text{взаим.}) = N_p(1 - \exp(-X/\lambda)) = N_p(1 - \exp(-20.36/185)) = 0.11N_p$ . В этом выражении

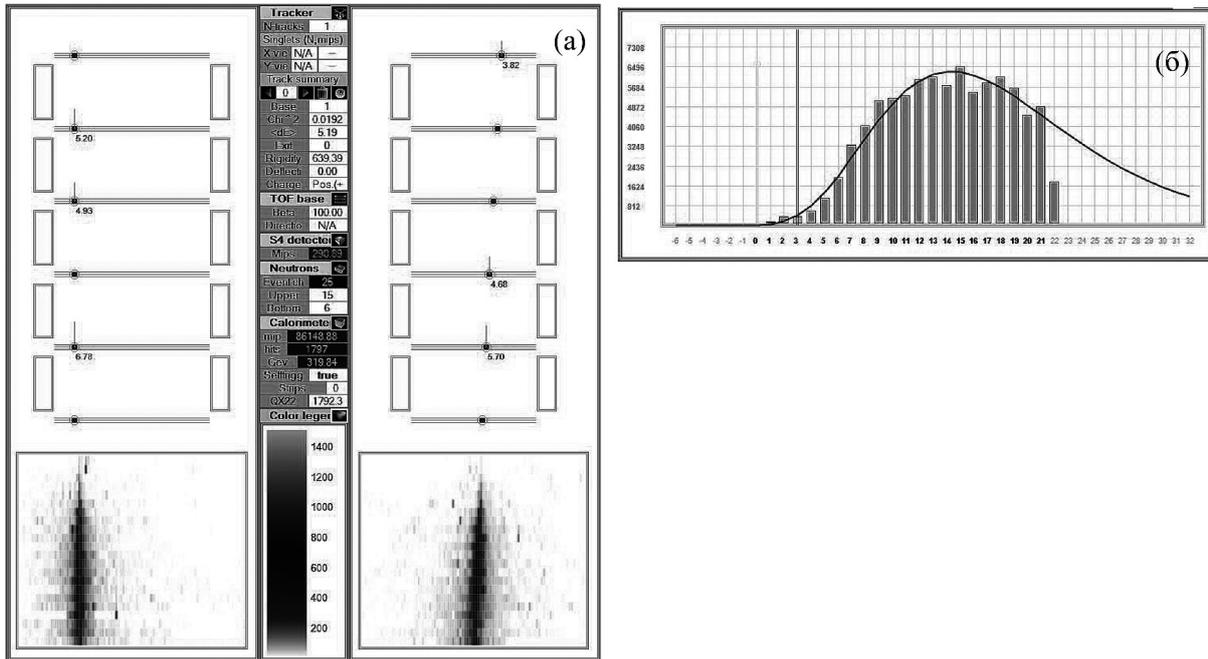


Рис. 3: (а) То же самое, что и на рис. 1(а), но для  $\alpha$ -частицы, которая проходит через трекер и калориметр. (б) Каскадная кривая, образованная в калориметре  $\alpha$ -частицей с  $E \approx 660$  ГэВ/н и расчет, описывающий этот каскад (огibaющая кривая). НД зарегистрировал 25 нейтронов.

$X$  – толщина 4-х слоев вольфрама, равная  $20.36$  г/см<sup>2</sup>,  $\lambda$  – пробег протона до ядерного взаимодействия в вольфраме, равный  $185$  г/см<sup>2</sup> [6]. Таким образом, требование начала каскада в калориметре в первых 4-х слоях вольфрама уменьшает долю протонов в полном числе отобранных событий  $\sim$  в 10 раз.

*Шаг 3.* Для электронных событий вся энергия выделяется в электромагнитном каскаде. В случае протонных событий в калориметре выделяется в среднем 0.3 энергии протона. При одинаковой энергии, выделенной электроном и протоном в калориметре, их первичные энергии различаются в среднем в  $\sim 3$  раза. Если энергия электрона равна  $E$ , то энергия протона будет равна  $3E$ . Пусть  $N_p(E) = AE^{-2.75}$ , тогда  $N_p(3E) = A \cdot (3E)^{-2.75} = 0.049 \cdot N_p(E)$ . Таким образом, при сравнении одинаковых энерговыделений в калориметре от электрона с энергией  $E$  и протона с энергией  $3E$ , доля протонов в отобранных событиях будет уменьшена в  $\sim 20$  раз. После выполнения условий первых трех шагов доля протонов, попадающих в трекер и взаимодействующих в калориметре, будет составлять  $\sim 5.4 \cdot 10^{-3}$  от полного числа частиц в системе трекер + калориметр.

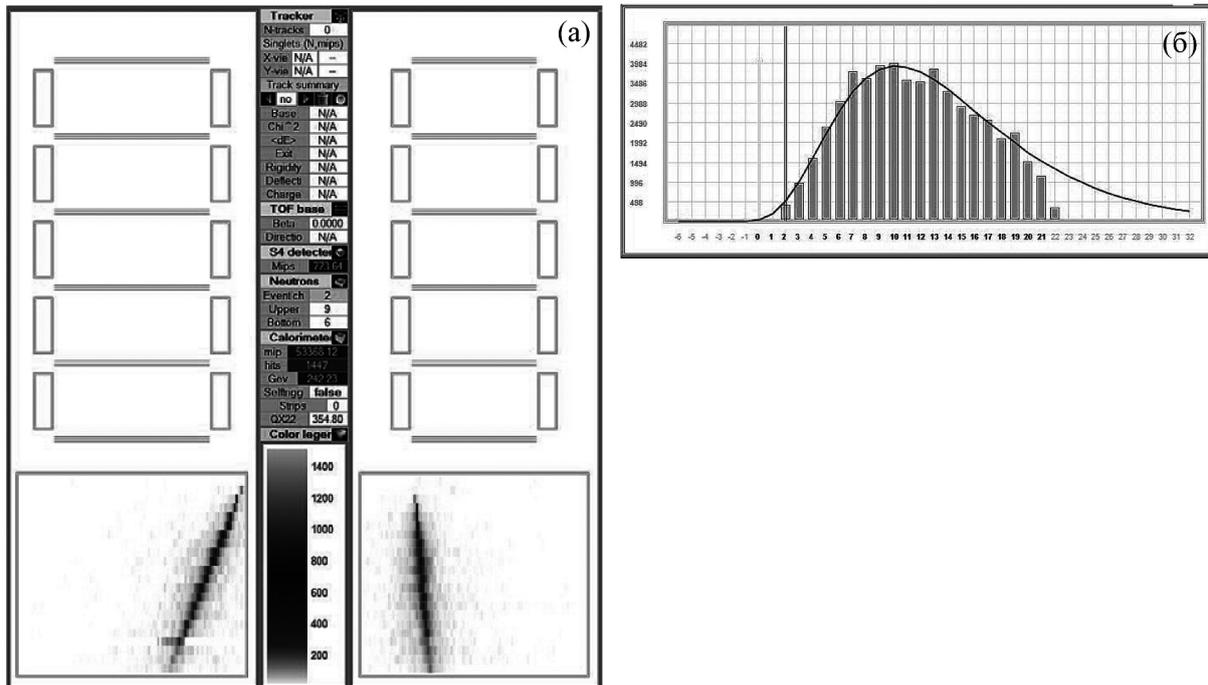


Рис. 4: (а) Электрон проходит вне трекера (верхняя часть рис. 4(а)), пересекает верхнюю и нижнюю плоскости калориметра и дает каскад в нем (нижняя часть рис. 4(а)). (б) Каскадная кривая, образованная в калориметре электроном с  $E \approx 450$  ГэВ и расчет, описывающий этот каскад (огнивающая кривая). НД зарегистрировал 2 нейтрона.

*Шаг 4.* Для дальнейшего выделения электронов из полного потока однозарядных частиц используем данные нейтронного детектора. Электроны и позитроны образуют электромагнитные каскады в калориметре практически без нейтронов. Очень небольшое число нейтронов образуется в результате фотоядерных взаимодействий каскадных гамма-квантов с ядрами вольфрама в районе гигантского резонанса при энергиях гамма-квантов  $\sim (13 - 20)$  МэВ. Каскады, образованные в калориметре протонами (или другими ядрами), содержат гораздо большее число нейтронов. При взаимодействии протона с ядром мишени (в нашем случае с ядром вольфрама) последнее возбуждается и это возбуждение снимается испусканием из ядра испарительных протонов и нейтронов со средней энергией несколько МэВ. При каждом ядерном взаимодействии протона или другой ядерно-активной частицы с ядром вольфрама образуется в среднем  $\sim 20$  нейтронов [3]. В спектрометре ПАМЕЛА испарительные нейтроны замедляются полиэтиленом до тепловых энергий ( $\sim 0.025$  эВ) и регистрируются гелиевыми счетчиками.

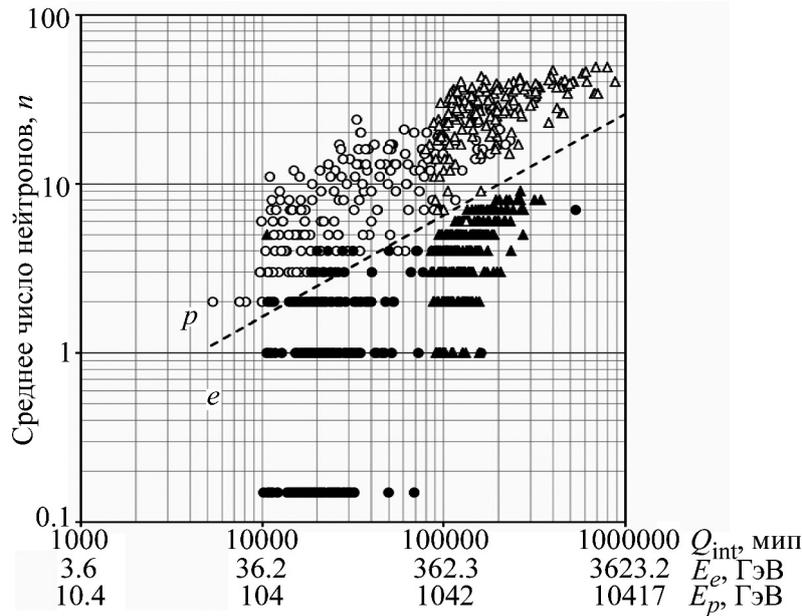


Рис. 5: Число нейтронов  $n$ , образованных в каскаде и зарегистрированных нейтронным детектором, в зависимости от полной энергии каскада  $Q_{\text{int}}$ . Черные точки и черные треугольники относятся к каскадам от электронов. Открытые точки и открытые треугольники относятся к каскадам от протонов и ядер. Пунктирная линия отделяет электронные и позитронные каскады от протонных. Вдоль оси  $X$  показана величина  $Q_{\text{int}}$  и энергии электронов и протонов, которые вызвали соответствующие каскады.

Эффективность регистрации испарительных нейтронов нейтронным детектором спектрометра ПАМЕЛИА составляет  $\sim 10\%$ . На рис. 5 приведена зависимость числа нейтронов, зарегистрированных НД, от полной энергии каскада, образованного в калориметре. Каскады были образованы электронами и протонами. Величина полной энергии каскада  $Q_{\text{int}}$ , выраженная в мипах, представляет площадь под рассчитанной каскадной кривой (см. огибающие на рис. 1–4). На рис. 5 черные точки относятся к каскадам, образованным в калориметре электронами, прошедшими через трекер и калориметр. Черные треугольники относятся к таким же частицам, но прошедшим только через калориметр: частица и образованный ею каскад проходят через верхнюю и нижнюю плоскости калориметра. Для таких событий геометрический фактор калориметра с размерами  $24 \times 24 \times 18 \text{ см}^3$  равен  $511.6 \text{ см}^2 \text{ ср}$ . Селекция протонов от электронов проводилась следующим образом. Для выделения протонов выбирались однозарядные частицы, которые давали каскад, начиная с 5-го по 10-й слой в калориметре. Для выделения электронов

для энергий меньше  $\sim 150$  ГэВ учитывался знак заряда по данным трекера. В области энергий более 150 ГэВ все электронные события дают малое число нейтронов по сравнению с протонами при одном и том же энерговыделении в калориметре [3]. Открытые точки и открытые треугольники на рис. 5 относятся к протонам и ядрам.

Пунктирная прямая на рис. 5 имеет вид  $n = 6.55 \cdot 10^{-3} \cdot (Q_{\text{int}})^{0.6}$  и отделяет протоны от электронов и позитронов. Из рис. 5 видна высокая степень выделения электронов и позитронов из полного потока заряженных частиц. Из рис. 5 также видно, что для высокоэнергичных частиц  $Q_{\text{int}} \geq 200000$  мип не наблюдается ни одного случая перемешивания протонов и ядер с лептонами.

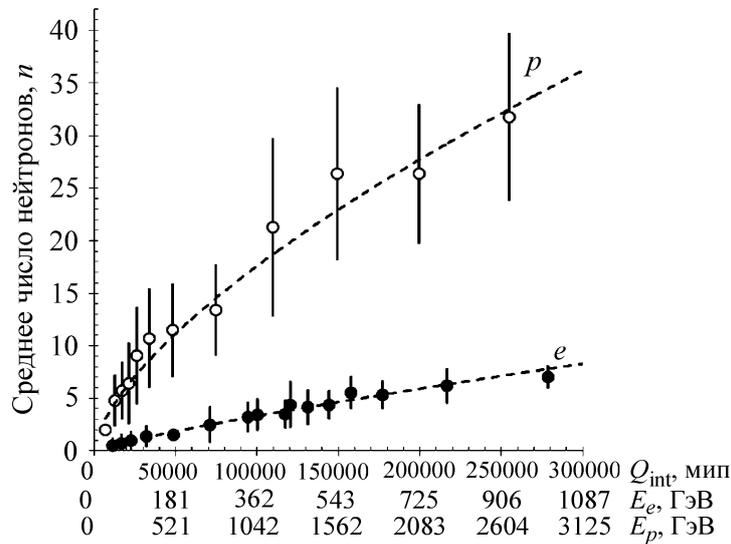


Рис. 6: Среднее число нейтронов  $n$  в одном каскаде, образованных протонами (открытые точки) и электронами (черные точки) в зависимости от энергии каскада  $Q_{\text{int}}$ . Вдоль оси  $X$  отложены величина  $Q_{\text{int}}$  и соответствующие им энергии электронов и протонов. Вертикальные отрезки показывают среднеквадратичные ошибки распределения событий.

На рис. 6 приведено среднее число нейтронов  $n$ , образованных протонами и электронами в зависимости от энергии каскада  $Q_{\text{int}}$ . Для протонов эта зависимость аппроксимируется выражением  $n_p = 9.2 \cdot 10^{-3} \cdot (Q_{\text{int}})^{0.66}$ , для электронов и позитронов имеем  $n_e = 2 \cdot 10^{-4} \cdot (Q_{\text{int}})^{0.84}$ . Из данных, показанных на рис. 6, видно надежное разделение протонов и ядер от лептонов по числу зарегистрированных нейтронов. При энергиях электронов более 200 ГэВ вклад протонов в поток электронов будет составлять не более 3%. Степень надежности увеличивается с ростом энергии каскада в калориметре.

*Заключение.* В настоящее время изложенная методика используется для получения спектров протонов, ядер, электронов и позитронов в широкой области энергий. Обработка включает в себя компьютерную часть и визуальную инспекцию событий.

Работа была выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 13-02-00931).

Авторы работы выражают благодарность рецензенту за ценные и полезные замечания.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] P. Picozza et al., (PAMELA Collaboration). *Astr. Phys.* **27**, 296 (2007).
- [2] А. В. Богомолов и др., Ведение банка расчетных данных для экспресс-обработки и анализа информации НА ПАМЕЛА в части НД. Отчет ЛФТИ по теме ПАМЕЛА. Шифр ОКР “ФТИ НД-2008”, 2008.
- [3] J. R. Floricen et al., *Phys. Rev.* **D13**(2), 558 (1976).
- [4] C. Song for HIREs collaboration. Study of the longitudinal development of air shower with CORSICA. Proc. of ICRC, 2001, Hamburg, Germany, HE, 490.
- [5] А. А. Квашнин, Ю. И. Стожков, Краткие сообщения по физике ФИАН **40**(1), 33 (2013).
- [6] Particle data group. *Journal of Physics G. Nuclear and Particle Physics* **33**, 1232 (2006).

Поступила в редакцию 2 декабря 2014 г.