

## ОЦЕНКА ВЕЛИЧИНЫ ОБРАТНОГО ТОКА ПО ДАННЫМ КАЛОРИМЕТРА ПАМЕЛА

А. А. Квашнин, А. Н. Квашнин,  
В. И. Логачёв, Ю. И. Стожков

*При измерениях спектров частиц космических лучей в области высоких энергий используются калориметры и детекторы заряда частицы. В результаты этих экспериментов могут вносить искажения частицы каскада, идущие в противоположном направлении относительно направления развития каскада (обратный ток) [1, 2]. В данной работе на примере детектора заряда частиц и калориметра в спектрометре ПАМЕЛА дана оценка вклада частиц обратного тока в определение заряда первичной частицы и в определение ее энергии в калориметре.*

**Ключевые слова:** космические лучи, протоны, нейтроны, электроны и позитроны, энергетический спектр, определение заряда, частицы обратного тока.

*Введение.* Для измерения состава и энергетических спектров частиц в области больших энергий используются детекторы заряда частиц и калориметры. В этих экспериментах существенную роль могут играть частицы так называемого обратного тока, т.е. частицы каскада, идущие в противоположном направлении относительно направления развития каскада.

Современные спектрометры имеют в своем составе детекторы заряда частиц, в состав которых входит несколько слоев твердотельных стриповых детекторов или оптически прозрачных волокон (файберов). Такого типа детекторы имеют высокое (до нескольких мкм) пространственное разрешение. Для определения энергии частицы используются калориметры толщиной до нескольких десятков радиационных единиц [3–6].

Такие детекторы входят и в состав спектрометра ПАМЕЛА, который подробно описан в работе [3]. Блок-схема спектрометра приведена на рис. 1. Из всего комплекса

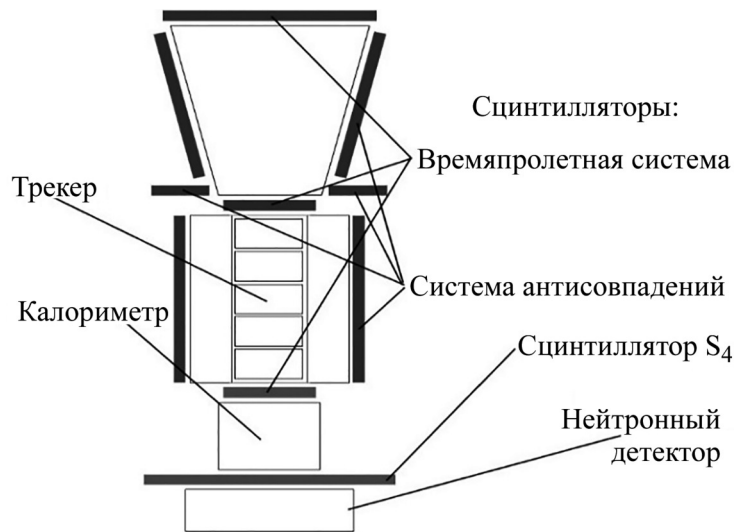


Рис. 1: Блок-схема детекторов спектрометра ПАМЕЛА.

детекторов ПАМЕЛА мы используем данные детектора заряда частицы (трекера), находящегося в поле постоянного магнита с величиной магнитной индукции  $B = 0.48$  Тл, данные калориметра изображений и нейтронного детектора.

Трекер состоит из 6-ти двусторонних твердотельных кремниевых пластин с микрострипами. На одной стороне пластины стрипы направлены вдоль оси  $X$  ( $X$ -плоскость), на другой – вдоль оси  $Y$  ( $Y$ -плоскость). Пространственное разрешение точки прохождения заряженной частицы в трекаре составляет несколько мкм [3].

Калориметр изображений спектрометра ПАМЕЛА построен на основе 44-х слоев стриповых детекторов, которые позволяют получить пространственное разрешение 20 мкм. Каждая пара стриповых детекторов содержит слой вольфрама толщиной 0.7 см. Полная толщина калориметра составляет 16 радиационных единиц [3]. Энерговыделения в спектрометре будем определять в мипах: 1 мип равен энерговыделению однозарядной релятивистской частицы в твердотельном детекторе.

*Определение уровня фоновых шумов.* Прежде всего, определим фоновые шумы в калориметре. Для этого сначала рассмотрим однозарядные события с жесткостью не менее 10 ГВ, проходящие в апертуре телескопа “трекер+калориметр”. При этом частицы должны пройти всю длину калориметра без ядерного взаимодействия и оставить в калориметре след от ионизационных потерь. Для таких событий траектория частицы в трекаре и траектория частицы в калориметре лежат на одной прямой как в плоскости  $XZ$ , так и плоскости  $YZ$ .

При выделении однозарядных частиц отбирались события со средним энерговыделением в плоскостях трекера  $dE/dx < 3$  мип (минимально ионизирующая частица) [4]. Тогда в калориметре среднее энерговыделение в каждой плоскости (всего 44 плоскости) также должно быть в пределах  $dE/dx < 3$  мип. Полное энерговыделение однозарядной частицы в калориметре не должно превышать  $\sim 140$  мип.

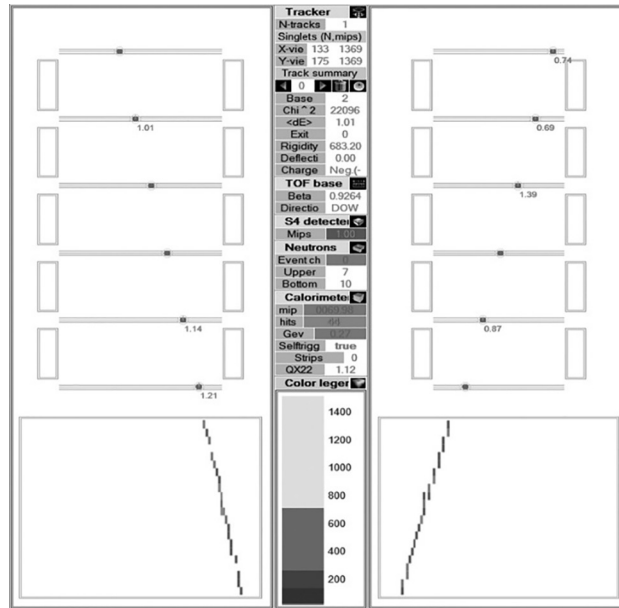


Рис. 2: Левая панель показывает проекцию трека частицы в плоскости  $XZ$ , правая – в плоскости  $YZ$ . Верхние части рисунка изображают трекер, нижние квадраты – калориметр.

Из требования отсутствия ядерного взаимодействия однозарядной частицы в калориметре следует считать, что все отбираемые события вызваны исключительно протонами [5]. В качестве примера на рис. 2 изображено такое событие. Протон с жесткостью  $R = 680$  ГВ и полным энерговыделением в калориметре  $Q_{\text{tot}} = 70$  мип проходит через трекер и калориметр и оставляет там след от ионизации. На рис. 2 видно, что фоновых шумов нет (отсутствуют сработавшие стрипы вне пределов следа).

Было проанализировано  $\sim 2000$  событий. Для нахождения фоновых шумов в калориметре отбирались одиночные энерговыделения в стрипах, отстоявших от траектории частицы более чем на 3 стрипа. Как правило, эти энерговыделения не превышали 3 мип на 1 стрип.

Распределение фоновых энерговыделений в одиночных стрипах показано на рис. 3 (усреднено по всем событиям).



Рис. 3: Распределение средних фоновых энерговыведений в одиночных стрипах, в процентах от общего числа сработавших стрипов.

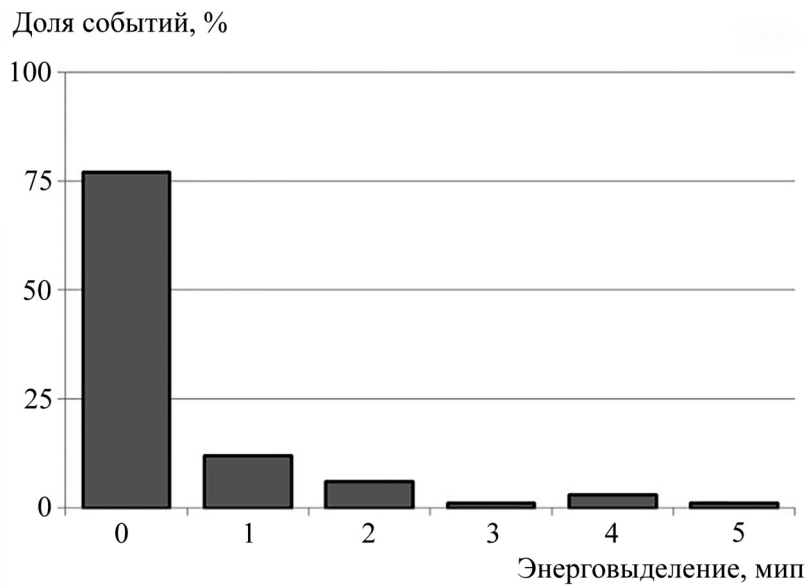


Рис. 4: Распределение величины фоновых шумов для всех ~2000 событий.

Распределение для всех событий величины фоновых шумов (энерговыведение в калориметре за вычетом энерговыведения вдоль траектории частицы) показано на рис. 4.

Из анализа этих данных можно сделать вывод, что при прохождении одиночной частицы без ядерного взаимодействия с веществом калориметра фоновые шумы в калориметре практически отсутствуют. Действительно, если сравнить число событий без шумов (1660) с числом событий, в которых наблюдались шумы (340), и поделить усредненное по всем событиям энерговыделение шумов на общее число стрипов в калориметре (4224), то наблюдаемыми шумами можно пренебречь.

*Однозарядные события с взаимодействием в калориметре.* Для исследования событий с взаимодействием в калориметре отбирались однозарядные частицы в тре-кере, имеющие жесткость не менее 10 ГВ и прошедшие в апертуре телескопа “тре-кер+калориметр”. Отбирались частицы, которые проходили первые 5–7 слоев калори-метра без взаимодействия, т.е. имели лишь ионизационные потери, а траектория части-цы в тре-кере и ось каскада в калориметре являлись продолжением друг друга.

Основной задачей данного анализа было обнаружение и подсчет одиночных энерго-выделений в слоях калориметра, находящихся выше точки взаимодействия частицы с веществом калориметра (с ядром вольфрама). Эти одиночные энерговыделения скорее всего и являются частицами обратного тока.

Было отобрано 1200 таких событий, большая часть из которых (950) образовали каскады в калориметре, а 250 событий были связаны с развалом ядра и траекториями его осколков.

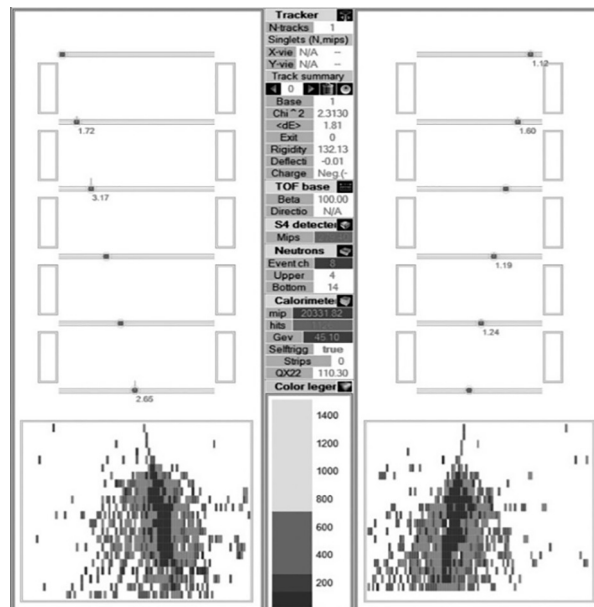


Рис. 5: Однозарядное событие с каскадом в калориметре.

а) События с образованием каскада в калориметре.

Типичное событие с образованием каскада в калориметре, вызванное протоном с жесткостью  $R = 130$  ГВ и энерговыделением в калориметре  $Q_{\text{tot}} = 20300$  мип, показано на рис. 5. В верхней части калориметра до точки взаимодействия в плоскостях  $X$  и  $Y$  можно выделить 7 стрипов вне траектории частицы с энерговыделением  $\sim(1-3)$  мип в каждом.

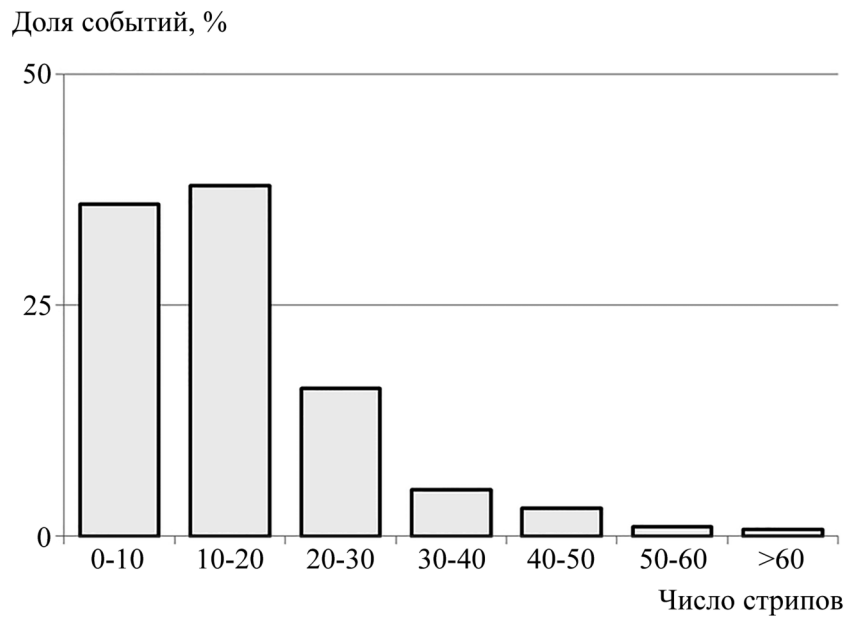


Рис. 6: Распределение событий с каскадом в калориметре в зависимости от числа сработавших стрипов вне траектории частицы.

В событиях с образованием каскада рассматривалась часть калориметра до начала каскада (до точки взаимодействия). Получено распределение событий в калориметре по числу сработавших стрипов с энерговыделением вне траектории частицы в каждом событии (рис. 6). Видно, что до начала каскада наблюдается значительное число сработавших стрипов вне траектории частицы.

б) События с развалом ядра.

Проанализировано 243 события. Распределение событий с развалом ядра по числу сработавших стрипов с энерговыделением вне траектории частицы показано на рис. 7. Так же, как и в предыдущем случае (см. рис. 6), наблюдается значительное число сработавших стрипов в верхней части калориметра вне траектории протона, вызванных частицами обратного тока.

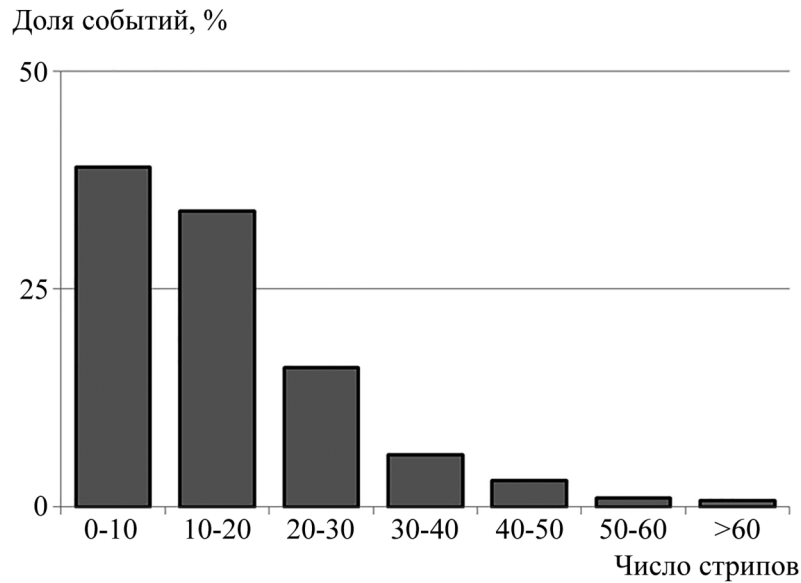


Рис. 7: Распределение событий по числу сработавших стрипов при взаимодействии с развалом ядра.

*Каскады, вызванные частицами с зарядом  $Z > 1$ .* Рассматривались также события с каскадами, образованными частицами с зарядом больше единицы. Было рассмотрено 560 событий с каскадом, вызванных частицами с зарядом  $Z \geq 5$ . Каскад начинался после 4 слоя калориметра. Во всех событиях наблюдались частицы обратного тока. Число сработавших вне траектории частицы стрипов доходило до 96.

*Частицы обратного тока в трекаре.* В трекаре каждая плоскость имеет 2035 стрипов вдоль оси  $X$  и 1024 стрипов вдоль оси  $Y$ . В трекаре одиночные энерговыделения вне траектории первичной частицы назовём синглетами. Были рассмотрены две выборки – события для протонов ( $\sim 28000$  событий с энерговыделением в калориметре выше 5 тыс. мип) и события для электронов ( $\sim 8600$  событий с энерговыделением в калориметре выше 5 тыс. мип).

На рисунках 8–11, приведенных ниже, показаны полученные распределения числа синглетов, зарегистрированных в трекаре вне траектории первичной частицы, по слоям трекара для протонов и электронов.

Как видно из рисунков 8–11, энерговыделения вне траектории зарегистрированной частицы в последнем слое трекара заметно выше, чем выделение в предыдущих слоях, что говорит о наличии частиц обратного тока с достаточно низкими энергиями (быстрое поглощение).

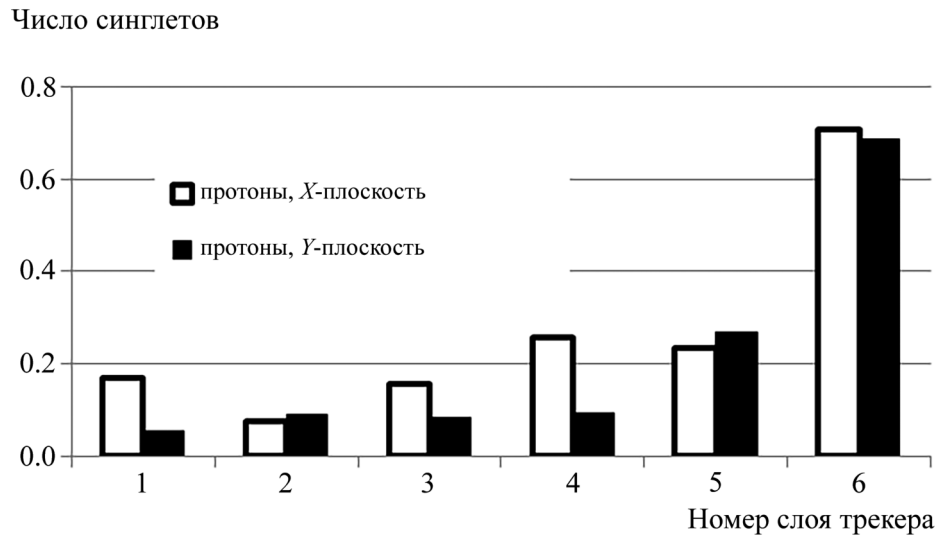


Рис. 8: Среднее число синглетов на одно протонное событие по слоям трекера.

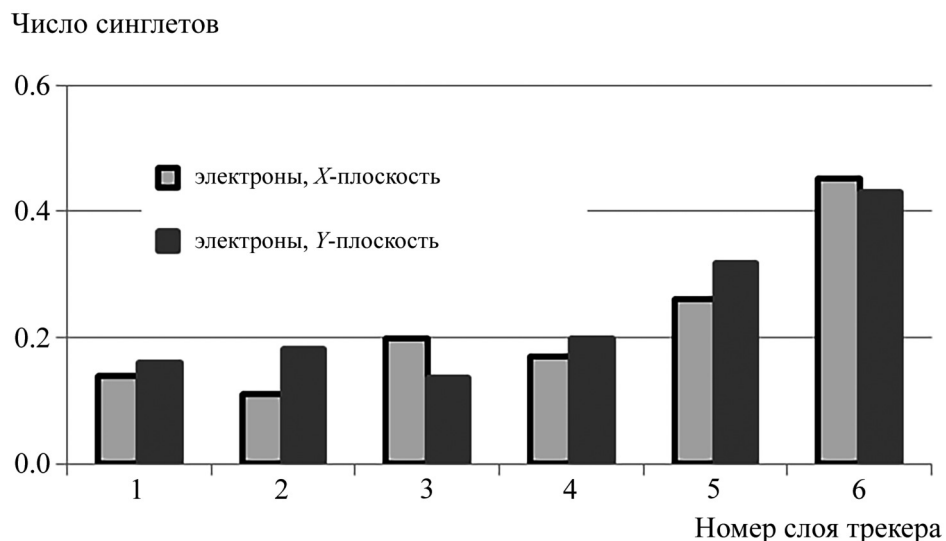


Рис. 9: Среднее число синглетов на одно электронное событие по слоям трекера.

*Выводы.* Обратный ток в калориметре ПАМЕЛА и аналогичных ему калориметрах образуется электронами, рождёнными от каскадных гамма-квантов, рассеянных в процессе комптоновских взаимодействий и летящих назад. Однако, как следует из результатов, полученных из данных калориметра ПАМЕЛА, средняя величина обратного тока, образуемого этими частицами, невелика.

Возможность проникновения частиц обратного тока в трекер, где происходит определение заряда частицы, маловероятна вследствие быстрого поглощения этих частиц в



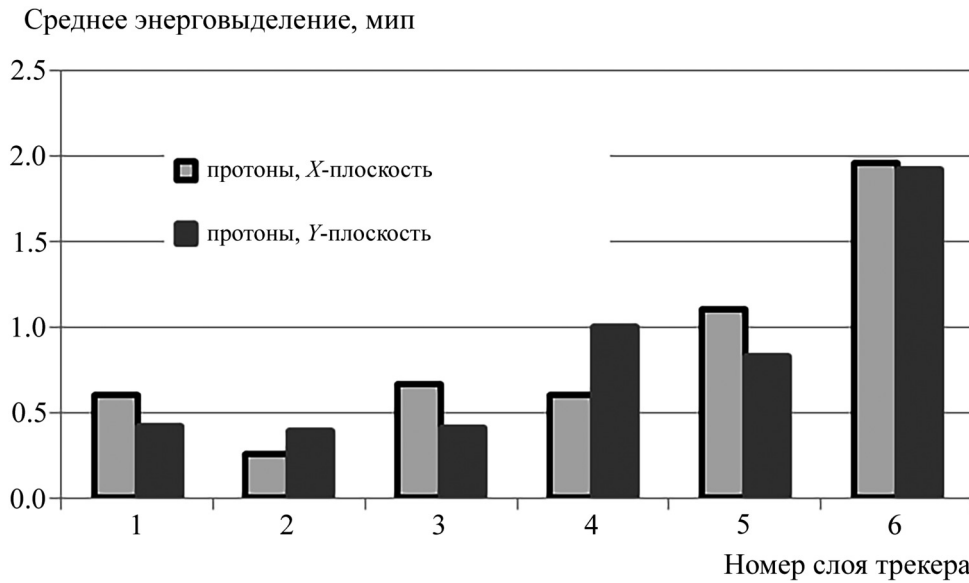


Рис. 10: Среднее энерговыделение в мип вне трека по слоям трекера на одно протонное событие.

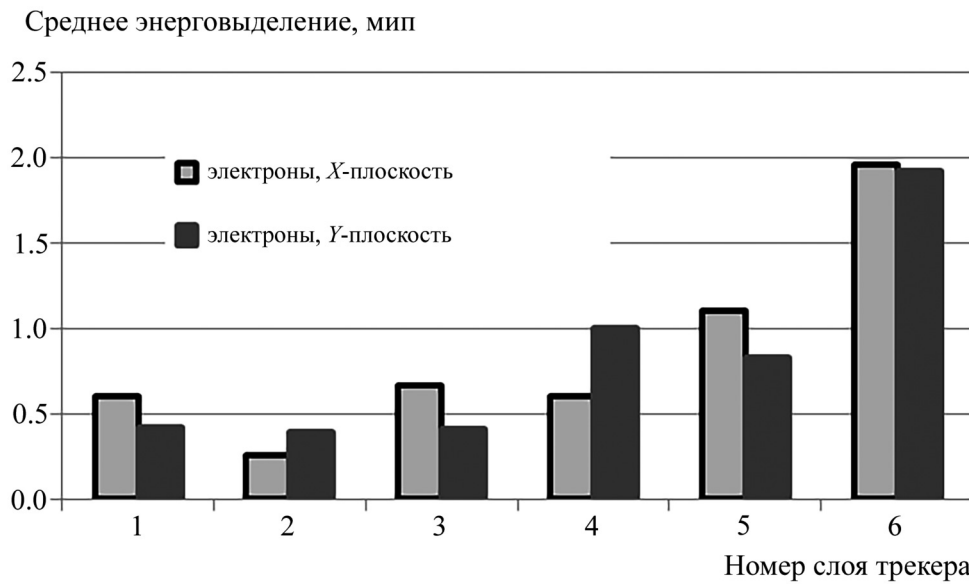


Рис. 11: Среднее энерговыделение в мип вне трека по слоям трекера на одно электронное событие.

вольфраме верхних слоёв калориметра и сильного отклонения электронов магнитным полем трекера. Тем не менее, в последнем слое трекера наблюдается некоторое увеличение числа синглетов относительно фонового значения, что может свидетельствовать о

проникновении частиц обратного тока в трекер ПАМЕЛА. Но так как определение заряда и энергии частиц ведётся по 6-ти плоскостям трекера, то такое увеличение энерговыделения в одной из плоскостей не скажется существенно на точности их определения.

Нужно отметить, что вследствие гораздо лучшего разрешения микроstriповых детекторов ПАМЕЛЫ по сравнению со сцинтилляционными детекторами, использовавшимися в ранних исследованиях ГКЛ [1, 2], спектрометр ПАМЕЛА позволяет обнаруживать прохождение каждой частицы обратного тока, дающей ионизацию как в детекторах калориметра, так и в детекторах трекера.

Работа была выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 17-02-00688а).

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] Н. Л. Григоров, Е. Д. Толстая, Препринт НИИЯФ МГУ-2003-22/735. <http://www.sinp.msu.ru/ru/system/files/preprints/pp-735.pdf>
- [2] Н. Л. Григоров, Г. П. Кахидзе, Е. Д. Толстая, Приборы и техника эксперимента № 1, 52 (2005).
- [3] P. Picozza et al., (PAMELA Collaboration) *Astroparticle Physics* **27**, 296 (2007).
- [4] А. А. Квашнин, Ю. И. Стожков, Краткие сообщения по физике ФИАН **40**(1), 33 (2013).
- [5] Ю. И. Стожков, С. В. Викторов, А. А. Квашнин и др., Краткие сообщения по физике ФИАН **43**(3), 27 (2016).
- [6] А. А. Квашнин, А. Н. Квашнин, Ю. И. Стожков, Изв. РАН, сер. физ. **81**(4), 439 (2017).

Поступила в редакцию 31 января 2018 г.

После доработки 6 ноября 2018 г.; 10 января 2019 г.

Принята к публикации 17 января 2019 г.