

СЕВЕРО-ЮЖНАЯ АСИММЕТРИЯ ЭЛЕКТРОНОВ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ ПО ДАННЫМ ЭКСПЕРИМЕНТА ПАМЕЛА

А. В. Карелин^{a **}, О. Адриани^d, Дж. Барбарино^e, Г. А. Базилевская^b, Р. Белотти^f,
М. Боецио^g, Э. А. Богомолов^c, Л. Бонекки^d, М. Бонджи^d, В. Бонвичини^g, С. Боттаи^d,
А. Бруно^f, А. Вакки^g, Е. Вануччини^d, Г. И. Васильев^c, С. А. Воронов^a, А. М. Гальпер^a,
И. А. Данильченко^a, К. Де Донато^h, К. Де Сантис^h, Н. Де Симоне^h, В. Де Феличе^h,
В. Г. Зверев^a, Дж. Зампа^g, Н. Зампа^g, Ф. Кафанья^f, Д. Кампана^e, Р. Карбоне^{e, h},
П. Карлосонⁱ, М. Казолино^h, Д. Кастеллини^j, А. Н. Квашинин^b, С. В. Колдашов^a,
С. А. Колдобский^a, С. Ю. Крутьков^c, А. А. Леонов^a, В. Мальвецци^h, Л. Марчелли^h,
М. Мартуччи^h, А. Г. Майоров^a, В. В. Малахов^a, В. Менн^k, М. Мерге^h, В. В. Михайлов^a,
Э. Мокьютти^g, А. Монако^f, Н. Мори^d, Дж. Остерия^e, Ф. Пальма^h, П. Папини^d,
М. Пирсⁱ, П. Пикоцца^h, Ч. Пиззолотто^g, М. Риччи^l, С. Риччарини^d, М. Ф. Рунцо^a,
Р. Саркар^g, М. Симон^k, Р. Спарволи^h, П. Спилантини^d, Ю. Т. Юркин^a*

^a Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 115409, Москва, Россия

^b Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук, 119991, Москва, Россия

^c Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук, 194021, Санкт-Петербург, Россия

^d INFN, Structure of Florence and Physics Department of University of Florence, I-50019, Florence, Italy

^e INFN, Structure of Naples and Physics Department of University of Naples, I-80126, Naples, Italy

^f INFN, Structure of Bari and Physics Department of University of Bari, I-70126, Bari, Italy

^g INFN, Structure of Trieste and Physics Department of University of Trieste, I-34012, Trieste, Italy

^h INFN, Structure of Rome Tor Vergata and Physics Department of University of Rome Tor Vergata, I-00133, Rome, Italy

ⁱ KTH, Department of Physics, and the Oskar Klein Centre for Cosmoparticle Physics, AlbaNova University Centre
10691, Stockholm, Sweden

^j Institute of Applied Physics, 50019, Florence, Italy

^k Universitat Siegen, D-57068, Siegen, Germany

^l INFN, Laboratori Nazionali di Frascati, I-00044, Frascati, Italy

Поступила в редакцию 22 марта 2013 г.

По данным спутникового эксперимента ПАМЕЛА, за период времени 06.2006–05.2009 одним прибором была измерена северо-южная асимметрия частиц космического излучения. Анализ проводился двумя независимыми методами — путем сравнения темпов счета в областях с одинаковыми геомагнитными условиями и путем сравнения экспериментального распределения направлений частиц с моделированным распределением, которое было бы в случае изотропного потока частиц. Были построены зависимости величины асимметрии от энерговыделения в калориметре ПАМЕЛА и от времени. Величина асимметрии $(N_n - N_s)/(N_n + N_s)$ при пороговом значении энерговыделения в калориметре равна 0.06 ± 0.004 и затем плавно убывает при росте энерговыделения. В работе показано, что наблюдаемый эффект вызван электронами в диапазоне энергий 10–100 ГэВ.

DOI: 10.7868/S0044451013080099

*E-mail: karelin@hotmail.ru

**А. В. Карелин, О. Адриани, Г. С. Барбарино, Г. А. Базилевская, Р. Беллотти, М. Боецио, Е. А. Богомолов, М. Бонджи, В. Бонвичини, С. Боттаи, А. Бруно, А. Вакки, Е. Вануччини, Г. И. Васильев, С. А. Воронов, А. М. Гальпер, И. А. Данильченко, К. Де Донато, К. Де Сантис, Н. Де Симоне, В. Де Феличе, В. Г. Зверев, Г. Зампа, Н. Зампа, Ф. Кафagna, Д. Кампана, Р. Карбоне, П. Карлосон, М. Казолино, Г. Кастеллини, А. Н. Квашинин, С. В. Колдашов, С. А. Колдобский, С. Ю. Крутьков, А. А. Леонов, В. Мальвецци, Л. Марчелли, М. Мартуччи, А. Г. Майоров, В. В. Малахов, В. Менн, М. Мерге, В. В. Михайлов, Э. Мокьютти, А. Монако, Н. Мори, Р. Мунини, Г. Остерия, Ф. Пальма, П. Папини, М. Пирс, П. Пикоцца, Ч. Пиззолотто, М. Риччи, С. Риччарини, М. Ф. Рунцо, Р. Саркар, М. Симон, В. Спарволи, П. Спилантини, В. Формато, Ю. Т. Юркин

nov, V. Malvezzi, L. Marcelli, M. Martucci, A. G. Mayorov, V. V. Malakhov, W. Menn, M. Merge, V. V. Mikhailov, E. Mochiutti, A. Monaco, N. Mori, R. Munini, G. Osteria, F. Palma, P. Papini, M. Pearce, P. Picozza, C. Pizzolotto, M. Ricci, S. B. Ricciarini, M. F. Runtso, R. Sarkar, M. Simon, V. Scotti, R. Sparvoli, P. Spillantini, V. Formato, Y. T. Yurkin

1. ВВЕДЕНИЕ

Космические лучи галактического происхождения несут информацию не только о глобальных процессах в дальнем космосе за пределами Солнечной системы, но также и о самой Солнечной системе и околоземном космическом пространстве. Измеряя потоки космических лучей высоких энергий, их состав, а также пространственное распределение по направлениям их прихода в момент регистрации, можно сделать вывод о процессах, связанных с прохождением частиц через гелиосферу и межпланетное пространство. Это, в свою очередь, дает ценную информацию для описания структуры гелиосферы и межпланетных магнитных полей.

Интенсивность космических лучей одного знака может меняться в зависимости от того, через какие области гелиосферы они распространяются. В ряде экспериментов, выполненных с помощью нейтронных мониторов и на баллонах в верхних слоях атмосферы [1–3], были получены результаты, свидетельствующие об асимметрии интенсивности космических лучей, регистрируемых в северном и южном полушариях. При этом различие в интенсивностях оказывается около 3%. Одно из возможных объяснений этому факту было дано в ряде теоретических работ [4, 5], показавших, что различие интенсивностей может быть связано с распространением космических лучей через южную или северную части гелиосферы.

Тем не менее цельной экспериментальной картины для изучений северо-южной асимметрии до сих пор не получено. Причинами является возможное влияние атмосферы или различие геомагнитного окружения в разнесенных между собой точках наблюдения, сделанного к тому же разными приборами.

В настоящей работе был устранен ряд отмеченных выше недостатков. Приведены результаты измерения северо-южной асимметрии интенсивностей потоков частиц, связанной с отрицательно заряженными частицами (электронами) космического излучения в диапазоне энергий от десяти до сотни ГэВ одним прибором в одинаковых геомагнитных условиях за пределами атмосферы по данным спутникового эксперимента ПАМЕЛА [6]. Величина асимметрии получена на основе двух различных методов — путем сравнения темпов счета зарегистрированных частиц и путем сравнения реальной экспериментальной карты направлений с моделированной картой для изотропного распределения по направлениям зарегистрированных частиц.

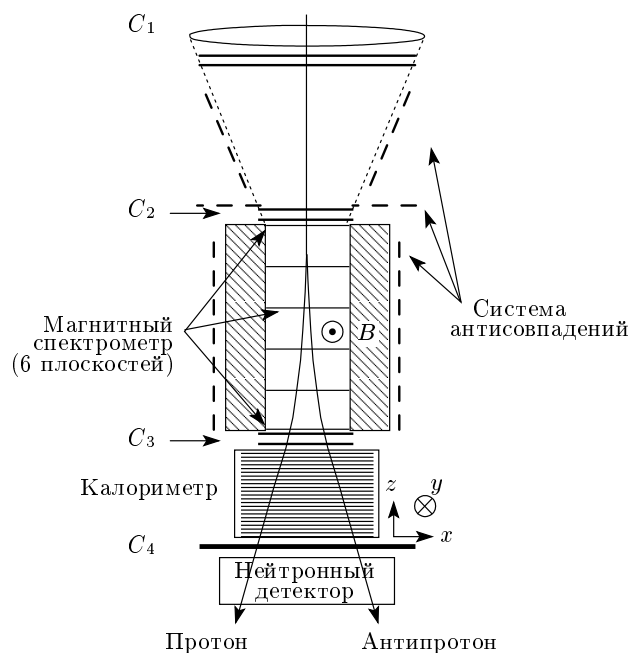


Рис. 1. Схема прибора ПАМЕЛА

2. ЭКСПЕРИМЕНТ ПАМЕЛА

Экспериментальный комплекс ПАМЕЛА в составе космического аппарата «Ресурс ДК1» был введен на орбиту Земли в июне 2006 г. и находится в активном состоянии по сегодняшний день. Орбита спутника эллиптическая с наклоном 70.4° высотой 350–650 км. Основная задача эксперимента ПАМЕЛА — изучение состава и энергетических спектров частиц космического излучения в широком диапазоне энергий.

Прибор ПАМЕЛА (рис. 1) состоит из нескольких детекторов: системы времени пролета с тремя двойными плоскостями сцинтилляторов, магнитного спектрометра с системой координатных кремниевых детекторов, электромагнитного калориметра, нижнего ливневого сцинтилляционного детектора C_4 , детектора нейтронов и счетчиков системы антисовпадений. Геометрический фактор для частиц высоких энергий (более 1 ГэВ), проходящих в пределах чувствительного объема магнитного спектрометра, равен $21.6 \text{ см}^2 \cdot \text{ср}$, что соответствует угловой апертуре $19^\circ \times 16^\circ$. Эта апертура является основной апертурой прибора. Мертвое время прибора составляет 5 мс. Габариты прибора $123 \times 89 \times 91 \text{ см}^3$.

Одной из возможностей прибора является расширение угловой апертуры с помощью триггеров, вырабатываемых позиционно-чувствительным калориметром и нижним сцинтилляционным детектором

C_4 , что позволяет существенно увеличить статистику для регистрируемых частиц высоких энергий. Эти триггеры вырабатываются при условии превышения энерговыделения внутри калориметра и C_4 пороговых величин, которые соответствуют возникновению мощного каскада вторичных частиц в калориметре при взаимодействии падающих частиц с его веществом. С помощью разработанной методики по восстановлению направления прилета частиц с помощью калориметра, о которой речь пойдет ниже, возможно определять траекторию первичной частицы по оси каскада, развившегося в калориметре, до углов к вертикали около 75° , при этом апертура прибора становится в десятки раз больше основной, что дает возможность увеличить регистрацию частиц высоких энергий. В дальнейшем расширенную таким образом апертуру, будем называть «широкой» апертурой.

Калориметр состоит из 22 слоев. Каждый слой образован из двух плоскостей кремниевых стриповых детекторов и пластины из вольфрама толщиной 2.3 мм ($Z = 74$, $A = 183.84$, $\rho = 19.3$ г/см³, $X_0 = 0.35$ см). Каждая плоскость кремниевых детекторов включает в себя 96 стрипов с шагом 2.2 мм, причем стрипы в соседних плоскостях расположены ортогонально друг другу, что позволяет измерять пространственное распределение события в калориметре в двух проекциях. Суммарная толщина калориметра составляет 0.6 ядерной длины взаимодействия (17 рад. длин). Подробное описание калориметра прибора ПАМЕЛА приводится в работе [7].

3. ОТБОР СОБЫТИЙ И ВОССТАНОВЛЕНИЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПРИЛЕТА ЧАСТИЦЫ

Предметом анализа служили события, в которых частицы приходили в «широкой» апертуре.

Для первоначального отбора основным критерием является пороговая величина полного энерговыделения в калориметре, единицы измерения которой «*mir*» соответствуют энерговыделению, регистрируемому при прохождении одной минимально ионизирующей частицы в одном слое детекторов. Критерий позволяет выделять частицы высоких энергий, испытывавшие взаимодействие в калориметре. Фиксированная величина полного энерговыделения в калориметре соответствует различным первоначальным энергиям для ядер, электронов и протонов. Расчет показал, что конкретно выбранное энерговыделение будет соответствовать некоторой величине первоначальной энергии электронов, в то время как оно со-

гласуется с в несколько раз большей кинетической энергией протонов и ядер.

Следующим критерием отбора являлось условие прохождения первичной частицы через калориметр. Около точки пересечения частицы какой-либо плоскости калориметра группируются стрипы с максимальным энерговыделением. События не рассматривались, если первичная частица не прошла сквозь вещество калориметра. Возникновение в калориметре событий с высоким энерговыделением, в которых при этом стрипы с максимальным энерговыделением не образуют трэк частицы, наиболее правдоподобно можно объяснить регистрацией в калориметре вторичных частиц от ливней, рожденных в магнитной системе прибора ПАМЕЛА, в веществе конструкции спутника или в стенках аппаратуры теми частицами, которые сами не попадали в широкую апертуру.

Для определения направления оси ливня был использован итерационный подход, который основан на методе наименьших квадратов, при этом для траектории первичной частицы используются только те стрипы, которые ближе всего располагаются к оси ливня, что существенно улучшает угловое разрешение. При первой итерации находятся положения центров тяжести энерговыделений в каждом слое в пределах размеров областей, где энерговыделения в стрипах образуют кластер, т. е. совокупность соседних стрипов, амплитуда сигналов в каждом из которых превышает наперед заданное значение. Затем методом наименьших квадратов определяется уравнение оси ливня в каждой проекции. В последующих итерациях устанавливаются новые границы кластера вокруг оси, координаты которой были получены на предыдущем этапе (границы зависят от полного энерговыделения в калориметре). В пределах этих границ происходит новое вычисление центров тяжести, таким образом получается уравнение новой оси и т. д. Подробное описание методики приведено в работе [8]. На рис. 2 представлены примеры событий с восстановленными осями ливней.

4. СЕВЕРО-ЮЖНАЯ АСИММЕТРИЯ, ПОЛУЧЕННАЯ ПРИ СРАВНЕНИИ ТЕМПОВ СЧЕТА

Для сравнения темпов счета частиц с севера N_n и с юга N_s (темп счета — число событий, зарегистрированное за единицу времени) были выбраны области нахождения спутника во время измерений, близкие к полярным в одном и том же интервале геомагнит-

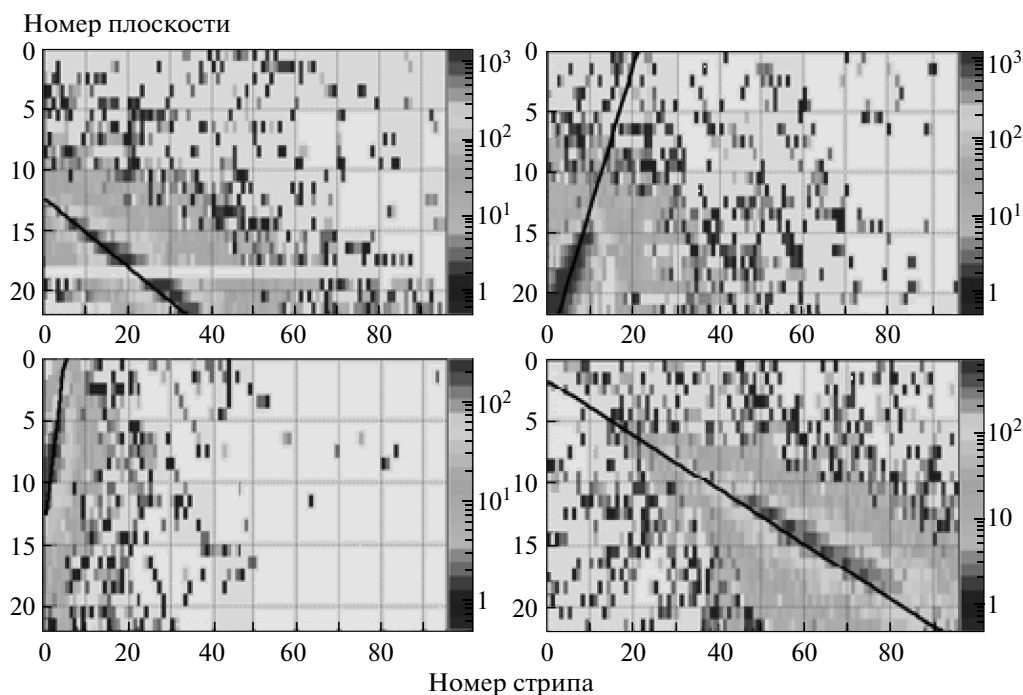


Рис. 2. Восстановленные треки частиц внутри калориметра. Экспериментальные данные

ных оболочек — с четвертой по пятнадцатую (речь идет о номере L -оболочки).

Пороговые импульсы частиц, падающих на Землю, зависят от геомагнитной широты. Инвариантная геомагнитная широта связывает геомагнитную широту силовой линии на поверхности Земли с заданным значением L выражением $\cos^2 \Lambda = 1/L$.

Однако в отобранных событиях часть частиц была отклонена магнитным полем Земли с низких широт. Чтобы избежать влияния данного эффекта, был введен дополнительный отбор событий по направлению в экваториальной системе координат. В этой системе направление частицы задается двумя углами: φ — склонение, θ — прямое восхождение. Отбирались частицы, приходящие с севера и с юга соответственно в интервалах углов φ — $(-60^\circ-80^\circ)$ и $(60^\circ-80^\circ)$, при этом события с углами φ вне указанных интервалов не прошли отбор.

Таким образом, путем отбора событий по одинаковым геомагнитным оболочкам и ограничения направления прилета частиц были созданы условия эквивалентности измерений темпов счета на севере и юге. Были рассмотрены события, зарегистрированные в период с июня 2006 г. по май 2009 г.

Для характеристики асимметрии была использована величина $(N_n - N_s)/(N_n + N_s)$. Изменение ве-

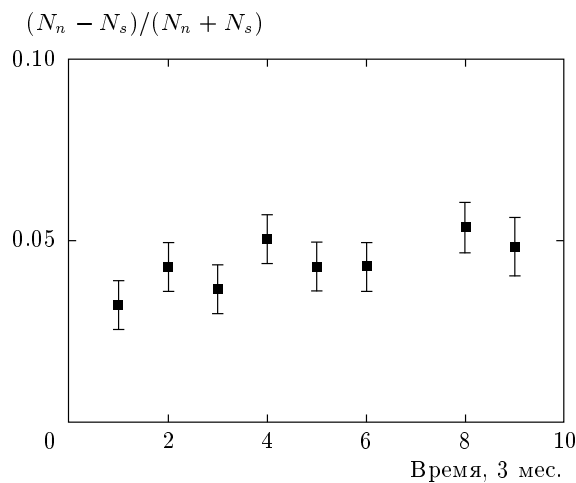


Рис. 3. Изменение величины $(N_n - N_s)/(N_n + N_s)$ во времени. Временной интервал равен трем месяцам. Данные приведены со 2 января 2007 г. по 20 апреля 2009 г.

личины $(N_n - N_s)/(N_n + N_s)$ со временем показаны на рис. 3. Время считается с 2 января 2007 г. Данные приведены только начиная с 180-го дня полета, так как в течение первых 180 дней происходили переключения триггеров и выбор оптимальных режимов работы, что могло оказать влияние на по-

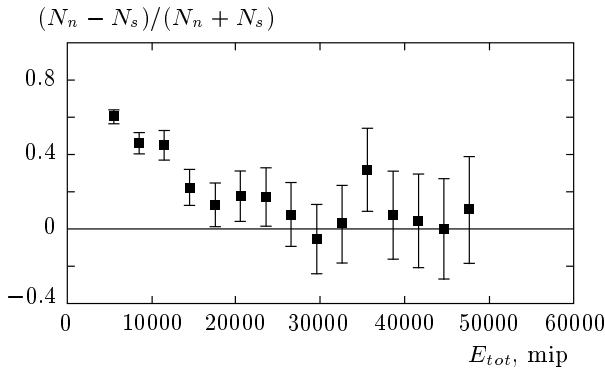


Рис. 4. Зависимость величины $(N_n - N_s)/(N_n + N_s)$ от полного энергосвечения в калориметре E_{tot}

стоянство величины темпов счета. Один временной интервал равен 90 дням. В седьмом интервале происходило выключение прибора, вследствие чего не приводятся данные для него. В целом соотношение $(N_n - N_s)/(N_n + N_s)$ мало меняется со временем, при этом постоянно наблюдается превышение темпа счета на севере в среднем на 3–4 %. На рис. 4 показана зависимость величины $(N_n - N_s)/(N_n + N_s)$ от полного энергосвечения в калориметре. Заметен плавный спад вплоть до энергосвечений 30000 mip (эта величина соответствует максимуму распределения по энергосвечениям для электронов с энергиями ~ 100 ГэВ).

Таким образом, путем сравнения темпов счета на севере и на юге в определенных L -оболочках и углах прилета частиц в экваториальной системе координат была получена величина асимметрии, которая зависит от энергии, входящей в прибор частицы, и за время наблюдения почти не изменяется.

5. СЕВЕРО-ЮЖНАЯ АСИММЕТРИЯ, ПОЛУЧЕННАЯ МЕТОДОМ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИЗОТРОПНОЙ КАРТЫ

Для подтверждения факта измерения «северо-южной» асимметрии в эксперименте ПАМЕЛА для отобранных согласно разд. 3 событий было построено распределение по направлениям этих событий в экваториальной системе отсчета. Затем было проведено сравнение полученного экспериментального распределения с моделированным изотропным распределением. Последнее было получено с учетом неоднородностей распределения

вещества в приборе и спутнике, неравномерной экспозиции, неізотропной эффективности регистрации, неравномерности фона и других факторов. Моделированное распределение событий по направлениям в экваториальной системе координат будем называть изотропной картой.

Данный метод использовался ранее в других экспериментах для поиска анизотропии и подробно описан в работе [11].

Идея метода создания изотропной карты, для последующего поиска анизотропии (в данном случае асимметрии) состоит в том, чтобы случайным образом распределить восстановленные направления прилета частиц в приборной системе координат в выборке экспериментальных данных. В случае идеального изотропного распределения потоков космических лучей по направлениям интенсивность будет одной и той же для данного направления в пространстве, — не зависящей от времени. Возможные временные изменения интенсивности будут обуславливаться только рабочими включениями-выключениями прибора в течение времени измерения.

Таким образом, можно промоделировать набор изотропных событий, используя только экспериментальные данные, случайным образом меняя направления внутри прибора относительно направления оси самого прибора в выбранной системе координат. Итак, берется восстановленное направление частицы внутри прибора ПАМЕЛА в одном событии, затем оно обменивается с измеренным направлением в случайно выбранном другом событии. При этом положения оси прибора в обоих событиях сохраняются. Повторение данной процедуры многократно с нормальным распределением вероятности выбора событий для обмена направлений внутри приборной системы координат позволяет смоделировать изотропную фоновую карту, соответствующую реальным экспериментальным данным.

Величина анизотропии S в интервале (φ, θ) определяется выражением [12]

$$S(\varphi, \theta) = \sqrt{2} \left\{ N(\varphi, \theta) \ln \left[\frac{\tau+1}{\tau} \frac{N(\varphi, \theta)}{N(\varphi, \theta)+b(\varphi, \theta)} \right] + b(\varphi, \theta) \ln \left[(\tau+1) \frac{b(\varphi, \theta)}{N(\varphi, \theta)+b(\varphi, \theta)} \right] \right\}^{0.5},$$

где φ — склонение, θ — прямое восхождение; $S(\varphi, \theta)$ — значимость избытка; $N(\varphi, \theta)$ — количество событий для данного углового интервала из экспериментальных данных, $b(\varphi, \theta)$ — ожидаемое из моделированной изотропной карты и $\tau = 1$ количество со-

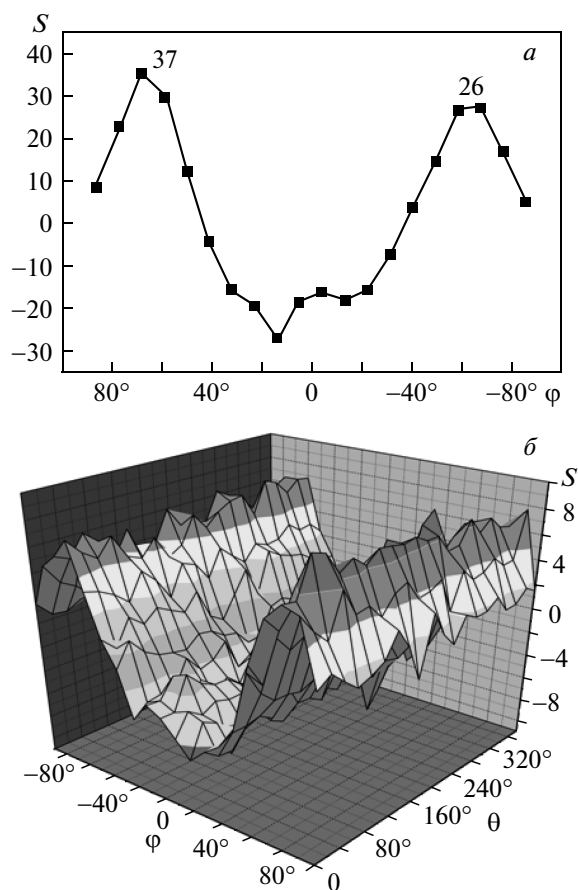


Рис. 5. Построенная карта анизотропии S в экваториальной системе координат методом моделирования изотропной карты: a — без разбиения по углам θ , b — с разбиением по углам θ

бытий для данного углового интервала (отношение статистик в экспериментальном и моделированном наборе событий).

Построенная таким образом карта анизотропии для событий, прошедших описанные выше процедуры отбора и восстановления оси ливня по калориметру, показана на рис. 5 (энерговыведение больше 4000 mip) за период 06.2006–05.2009 в экваториальной системе координат без разбиения и с разбиением по углам θ . Разбиение по углам θ проводилось для того, чтобы убедиться в том, что превышение значимости S на севере по сравнению с данной величиной на юге не происходит только в каком-либо одном угловом интервале.

Из карты следует, что для частиц, приходящих с севера под углами φ более 60° , величина S возрастает. Было рассчитано, что для того чтобы получить наблюдаемую разность в величинах S для севера и

юга, необходимо увеличение потока с севера в среднем на 3–5 %.

6. СВЯЗЬ ПОЛУЧЕННОЙ СЕВЕРО-ЮЖНОЙ АСИММЕТРИИ С ЭЛЕКТРОНАМИ

Одни и те же величины энерговыведения в калориметре, как отмечено выше, соответствуют более высокой энергии протонов и меньшей энергии электронов. Так, энерговыведение 4000 mip соответствует энергии протонов около 50 ГэВ и электронов около 10 ГэВ. Поэтому доля электронов в отобранных согласно разд. 3 событиях повышается по сравнению с долей электронов по отношению к протонам и ядрам в космических лучах [9]. Следовательно, электроны, обладая меньшей энергией при заданной величине энерговыведения в калориметре, с большей вероятностью ответственны за наблюдаемую северо-южную асимметрию, которая ярче проявляется при меньших значениях энерговыведения (см. рис. 5).

Данное предположение подтверждается следующим. Были проведены измерения количества частиц, приходящих в направлении с востока и запада, чтобы получить величину восточно-западной асимметрии на севере и на юге по отдельности. Как известно, эффект «восток-запад» [10] заключается в том, что из-за отклонения геомагнитным полем отрицательных частиц больше приходит с востока, N_e , чем с запада, N_w . Действительно, для отобранных событий N_e больше, чем N_w , а следовательно, в энерговыведениях до 30000 mip в отобранных событиях преобладают частицы, приходящие с востока, т. е. электроны. Сравнение эффекта «восток-запад» (отношение частиц, приходящих с западного направления к количеству частиц приходящих с востока) среди зарегистрированных событий в диапазоне L -оболочек 4–15 для частиц, приходящих под большими зенитными углами (именно для таких частиц эффект отклонения магнитным полем Земли наиболее значим), показало, что отношение N_e/N_w на юге составляет величину 1.079 ± 0.001 , в то время как на севере — 1.101 ± 0.001 , т. е. на севере с учетом погрешности измерения он более выражен. Это подтверждает гипотезу о том, что на севере темп счета повышен именно благодаря электронам.

Кроме того, использование детектора нейтронов прибора ПАМЕЛА для отбора электроноподобных событий (при ядерных взаимодействиях рождается больше нейтронов, чем при электромагнитных при одном и том же энерговыведении в калориметре) привело к увеличению асимметрии «север-юг».

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

За период времени 06.2006–05.2009, относящийся к периоду «отрицательной» полярности магнитного поля Солнца, в спутниковом эксперименте ПАМЕЛА для регистрируемых частиц путем измерения темпов счета, а также независимо от этого путем моделирования изотропной карты одним прибором была определена асимметрия север-юг. Количество зарегистрированных частиц на севере, оказалось больше чем на юге. Полученные результаты не противоречат ранним измерениям в атмосфере на баллонах [3].

Величина асимметрии $(N_n - N_s)/(N_n + N_s)$ зависит от энергии первичной частицы.

С ростом энергии эффект уменьшается до долей процента при энерговыделении 30000 mip (энергия электрона ~ 100 ГэВ). Так как измеряемая величина асимметрии среди отобранных событий зависит от энерговыделения в калориметре и сильнее выражена при более низких энерговыделениях, мы предположили, что наблюдаемый эффект асимметрии вызван электронами, что подтверждается изучением эффекта восток-запад на севере и на юге, а также измерениями детектора нейтронов.

Было исследовано поведение отношения потоков зарегистрированных частиц, приходящих с севера и с юга, во времени. За период времени измерений изменений в величине асимметрии обнаружено не было.

ЛИТЕРАТУРА

1. G. F. Krymsky, P. A. Krivoshekin, V. P. Mamrukova et al., *Geomagn. Aeron.* **21**, 923 (1981).
2. M. A. Shea and D. F. Smart, *Soc. Ital. di Fisica, Bologna* 398 (1988).
3. Y. I. Stozhkov, G. A. Bazilevskaya, P. E. Pokrevsky et al., *J. Geophys. Res.* **101**, A2 2523 (1996).
4. J. Chen, J. W. Bieber, and M. A. Pomerantz, *J. Geophys. Res.* **96**, 569 (1991).
5. D. B. Swinson, M. A. Shea, and J. E. Humble, *Geophys. Res.* **91**, 2943 (1986).
6. P. Picozza, A. M. Galper, G. Castellini et al., *Astroparticle Phys.* **27**, 296 (2007).
7. M. Boezio, V. Bonvicini, E. Mocchiutti et al., *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A* **487**, 407 (2002).
8. С. В. Борисов, С. А. Воронов, А. М. Гальпер, А. В. Карелин, *ПТЭ* № 1, 5 (2013).
9. С. В. Борисов, С. А. Воронов, А. В. Карелин и др., *Кратк. сообщ. по физике* **38**, 15 (2011).
10. B. Agrinier, Y. Koechlin, B. Parlier et al., *Lett. Nuovo Cimento* **1**, 53 (1969).
11. D. J. Bird et al., *Astrophys. J.* **511**, 739 (1999).
12. T. P. Li and Y.-Q. Ma, *Astrophys. J.* **272**, 317 (1983).