

ОЦЕНКА ВЕРХНЕГО ПРЕДЕЛА ДЛЯ АМПЛИТУДЫ ДИПОЛЬНОЙ АНИЗОТРОПИИ СУММАРНОГО ПОТОКА ЭЛЕКТРОНОВ И ПОЗИТРОНОВ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ С ЭНЕРГИЕЙ ОТ 25 ГэВ ДО 1 ТэВ

© 2019 г. А. В. Карелин*, С. А. Воронов
(от имени Коллаборации ПАМЕЛА)

Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, Россия

Поступила в редакцию 02.04.2019 г.; после доработки 02.04.2019 г.; принята к публикации 02.04.2019 г.

Работа посвящена поиску анизотропии суммарных потоков электронов и позитронов галактических космических лучей высоких энергий. Для анализа использовались данные магнитного спектрометра ПАМЕЛА, запущенного на орбиту Земли в июне 2006 г. и функционировавшего на ней до 2016 г. Основной отбор событий и определение направлений прилета частиц осуществлялись при помощи позиционно-чувствительного микрострипового калориметра. Нейтронный детектор использовался для дополнительного подавления фона протонов и ядер. В результате анализа информации за практически десятилетний период измерений были установлены верхние пределы амплитуды дипольной анизотропии суммарных потоков электронов и позитронов для двух диапазонов энергий 25–100 ГэВ и 100 ГэВ–1 ТэВ. Эти результаты дополняют данные других спутниковых экспериментов АМС-02 и ФЕРМИ.

DOI: 10.1134/S004400271905009X

1. ВВЕДЕНИЕ

Регистрируемый в окрестности Земли суммарный поток электронов и позитронов галактических космических лучей в диапазоне энергий от единиц ГэВ до 1 ТэВ формируется в относительно близких к нам источниках в Галактике, наиболее вероятно в остатках сверхновых. Близость источников этого потока обусловлена тем фактом, что электроны и позитроны космических лучей быстро теряют свою энергию в процессе распространения в межзвездной среде посредством синхротронного излучения, а также испытывая многократное обратное комптоновское рассеяние при столкновениях с фоновыми фотонами низких энергий. По причине близости источников, несмотря на то, что распространение от источников этих потоков будет подчиняться законам, находящимся в рамках диффузной модели и включающим в себя рассеяние электронов и позитронов в магнитных полях в Галактике (такое рассеяние делает практически невозможным определение первоначального направления потоков космических лучей в окрестности Земли), в измеряемом распределении по направлениям суммарного потока электронов и позитронов можно ожидать наблюдение некой

дипольной анизотропии относительно небольшой величины. Тем не менее, в ряде последних измерений в экспериментах АМС-02 [1], ФЕРМИ [2], ХЕСС [3] подобная анизотропия не была обнаружена. Однако совсем недавно в экспериментах CALET [4] и DAMPE [5] в области энергий около 1 ТэВ была обнаружена особенность в энергетическом спектре электронов, что свидетельствует о существовании ближайшего источника или группы источников суммарного потока позитронов и электронов. В то же время недавно в работе АМС-02 [6] был опубликован энергетический спектр электронов, в котором не наблюдаются явно выраженные особенности и который хорошо совпадает с суммарным энергетическим спектром электронов и позитронов, полученным при помощи калориметрического метода в эксперименте ПАМЕЛА несколько лет назад [7].

Следует заметить, что при помощи калориметра ПАМЕЛА наблюдалась западно-восточная асимметрия в потоках электронов, приходящих в прибор под большими углами [8], связанная с отклонением частиц космических лучей в магнитном поле Земли, что помимо прочего подтверждает возможности прибора для исследований дипольной анизотропии электронов. Настоящая работа является продолжением исследования суммарного спектра электронов и позитронов высоких энергий калоримет-

*E-mail: karelin5575@gmail.com

рическим методом в эксперименте ПАМЕЛА и посвящена результатам поиска дипольной анизотропии в их потоках. В предыдущих работах по поиску анизотропии космических лучей с помощью калориметра ПАМЕЛА впервые при помощи прямых измерений были получены характеристики дипольной крупномасштабной анизотропии потоков протонов и ядер гелия (величина амплитуды порядка 10^{-3}) [9]. Однако ожидаемая величина амплитуды дипольной анизотропии электронов и позитронов должна быть на порядок больше. Стоит отметить, что в настоящей работе (как было показано ранее в [10]) главной сложностью при поиске анизотропии лептонов является их выделение на фоне протонов и более тяжелых ядер.

2. ЭКСПЕРИМЕНТ ПАМЕЛА

Целями эксперимента ПАМЕЛА [11] являлись прецизионные измерения потоков частиц и античастиц космических лучей в широком интервале энергий. Магнитный спектрометр ПАМЕЛА был установлен на спутнике Ресурс-ДК1, который был выведен на орбиту в июне 2006 г. Спутник находился в рабочем состоянии на орбите около 10 лет до начала 2016 г. Все это время проводилась регистрация потоков космических лучей детекторными системами спектрометра ПАМЕЛА. Столь продолжительное время измерений (планировалось всего три года) позволило накопить объем статистики уже достаточный для таких задач, как поиск анизотропии потоков галактических космических лучей.

Научная аппаратура спектрометра ПАМЕЛА включала в себя детекторные системы различного назначения, служащие для идентификации типов частиц, измерения величины и знака заряда, жесткости, скорости, массы и энергии частиц [11]:

магнитный спектрометр (на основе его измерений в числе прочего были получены энергетические спектры электронов и позитронов с энергией до 100 ГэВ [12, 13] и установлен верхний предел для анизотропии электронов [14]);

координатно-чувствительный полупроводниковый калориметр;

времяпролетная система на основе сцинтилляционных счетчиков;

система сцинтилляционных счетчиков антисовпадений;

нижний сцинтилляционный ливневый детектор С4;

нейтронный детектор.

Угловая апертура, определяемая геометрическими размерами магнитной системы, составляет величину около 21 см^2 ср. Использование триггерного сигнала от нижнего ливневого детектора

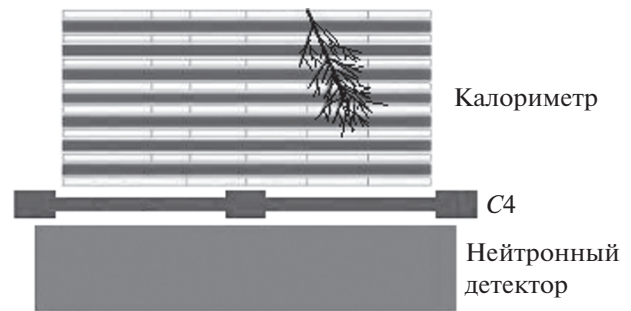


Рис. 1. Три детектора спектрометра ПАМЕЛА, образующих отдельную подсистему.

для частиц, рождающих каскад вторичных частиц в калориметре, позволило существенно увеличить апертуру (на два порядка), но только для измерений, производимых калориметрическим методом и без возможности использования магнитного анализа. Тем самым, с одной стороны, величина апертуры становится достаточно большой для набора статистики в задаче поиска анизотропии электронов (необходимое количество событий должно минимум составлять величину порядка 10^5), но, с другой стороны, резко уменьшаются возможности для отбора событий среди регистрируемых нужных частиц. Настоящая работа выполнена при помощи трех детекторов, работающих в связке и образующих своего рода отдельный детекторный сегмент (см. рис. 1) в спектрометре ПАМЕЛА.

В то время как нижний сцинтилляционный ливневый детектор С4 вырабатывал триггерный сигнал, калориметр и нейтронный детектор служили для подавления протонов и ядер среди регистрируемых событий. Кроме того, калориметр использовался для определения направления прилета частиц и ограничения их энергетического диапазона по величине полного энерговыделения.

3. МЕТОД АНАЛИЗА

Подробные сведения о калориметрических методах разделения частиц космических лучей по типу, измерению их направления и энергии в эксперименте ПАМЕЛА и подходах к поиску дипольной анизотропии можно найти в работах [15–17]. Здесь же мы коснемся только основных моментов проведенного анализа для поиска дипольной анизотропии электронов и позитронов.

Калориметр ПАМЕЛА является дискретным и состоит из 44 кремниевых детектирующих плоскостей, чередующихся с пластинами вольфрама, в которых инициируются и развиваются ливни [18]. Соседние плоскости ориентированы взаимно ортогонально для измерения характеристик развития ливня в двух проекциях. Электроны практически

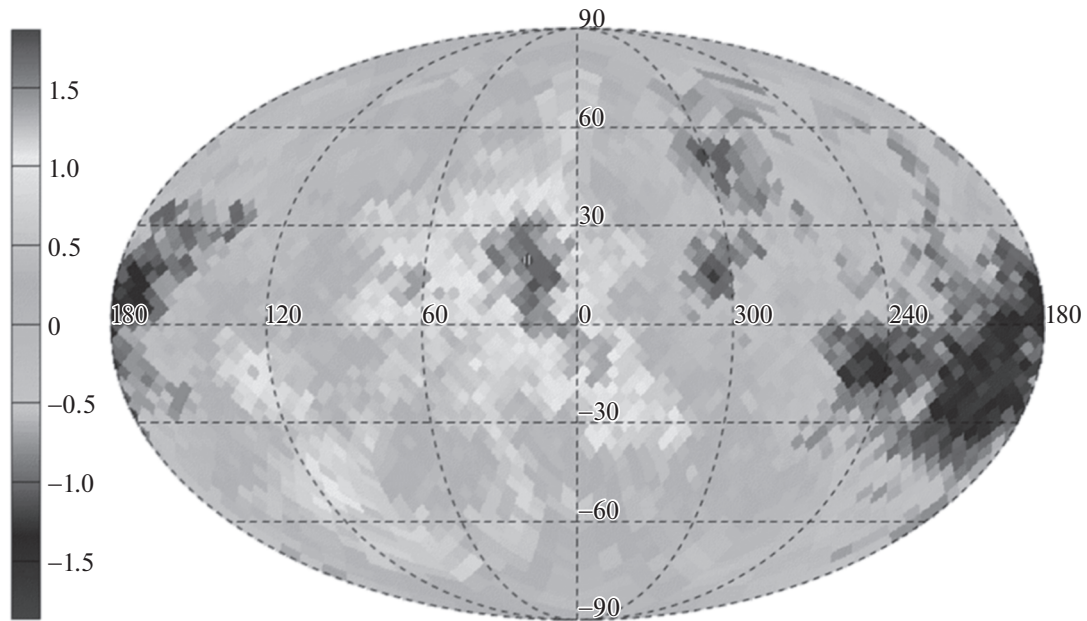


Рис. 2. Карта значимости S для высокоэнергичных отобранных событий при радиусе интегрирования 90° .

сразу же при взаимодействии с веществом калориметра дают каскад вторичных частиц. Поэтому основным критерием для отделения электронов и позитронов от протонов является величина полного энергосодержания в калориметре, свидетельствующая о наличии развитого каскада вторичных частиц в калориметре. Протоны же будут проходить калориметр, не создавая ливень вовсе, или генерировать каскад с равной вероятностью в любой точке своей траектории в калориметре. Таким образом, еще одним критерием является точка начала развития ливня. С помощью этих двух критериев можно подавить до 70% проходящих через калориметр протонов. Дополнительные критерии отбора по профилю каскада вторичных частиц, кроме режекции протонов, также приводят к существенной потере электронов (до 40%), что неблагоприятно отражается на набираемом объеме статистики. Поэтому для дальнейшего подавления протонов и ядер, помимо калориметра, использовался нейтронный детектор [10].

Как было сказано выше, при прохождении электрона (позитрона) высоких энергий через калориметр в нем развивается каскад вторичных частиц. Поэтому направление влета электрона в прибор может быть определено путем восстановления оси ливня внутри калориметра. Для нахождения оси ливня в серии последовательных итераций используются координаты только тех стрипов, которые должны быть ближе всего расположены к восстанавливаемой оси ливня, что существенно улучшает угловое разрешение. Угловое разрешение, определяемое таким способом для электронов с помощью итерационной методики, в целом не хуже, чем 1° в

одной какой-либо из двух проекций [15] и достаточно для поиска крупномасштабной анизотропии.

Для поиска анизотропии потоков частиц необходимо построить две карты угловых распределений. Одной из них является реальная экспериментальная карта, в то время как другой — моделируемая “изотропная” карта. Две карты накладываются друг на друга, различия в картах свидетельствуют об особенностях (анизотропии) в угловых распределениях наблюдаемых потоков. “Изотропная” карта строилась с помощью “шафлинг”-метода [19].

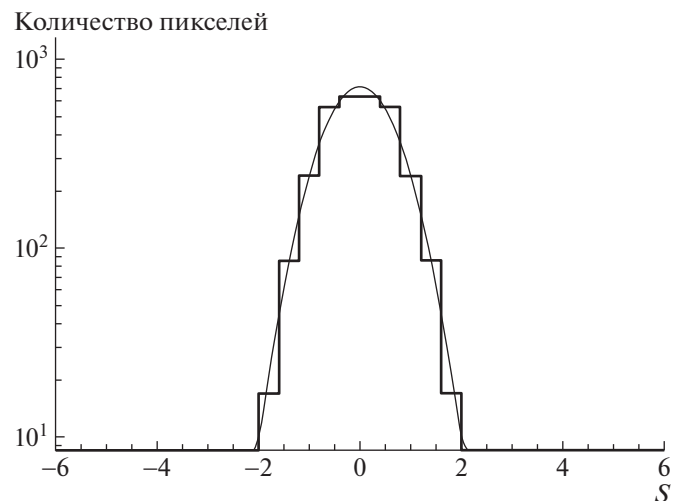


Рис. 3. Распределение значимости для карты с рис. 2 с наложенной на него функцией Гаусса.

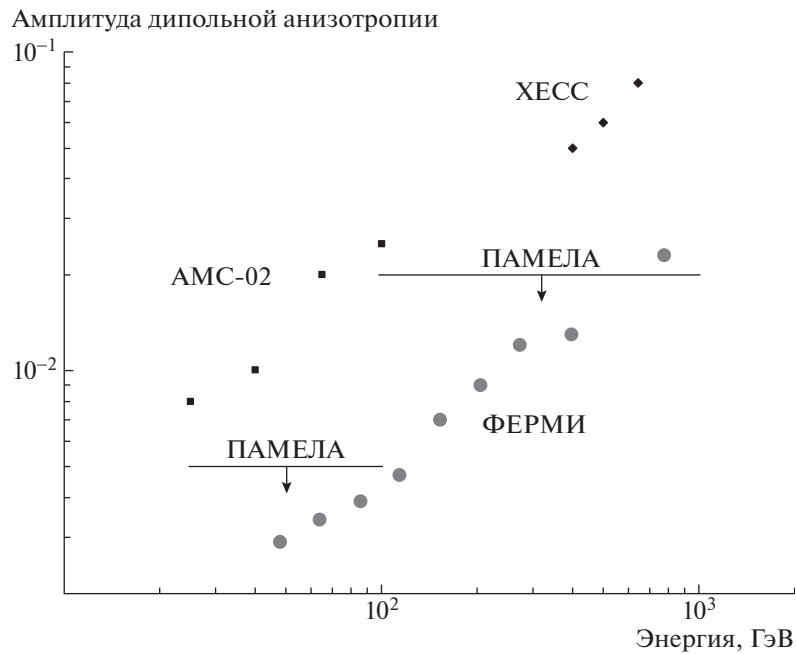


Рис. 4. Результаты измерений дипольной анизотропии электронов и позитронов калориметрическим методом в эксперименте ПАМЕЛА в сравнении с результатами других экспериментов (АМС-02 [1], ФЕРМИ [2], ХЕСС [3]). В эксперименте ХЕСС поиск анизотропии был направленным и был сосредоточен в области расположения источников Вела и Моногем.

Анализ был выполнен для двух различных энергетических диапазонов: 25–100 ГэВ, 100 ГэВ–1 ТэВ. На рис. 2 показана карта статистической значимости S , построенная по принципу, взятому из работы [20] в экваториальной системе координат для набора отобранных по вышеперечисленным правилам событий, полученных за время измерений спектрометром ПАМЕЛА на орбите Земли. Величина полного энерговыделения в калориметре использовалась для установления пороговой энергии электронов и позитронов.

Рисунок 2 соответствует электронам и позитронам с энергией более 100 ГэВ. При построении данной карты можно выбрать радиус интегрирования, т.е. размер областей (ячеек), из которых состоит карта. Радиус интегрирования, как правило, соответствует угловому размеру ожидаемой анизотропии. В случае поиска крупномасштабной анизотропии этот угол был взят равным 90° . В случае, когда не наблюдается анизотропия, распределение по величине S строго подчиняется распределению Гаусса, как это видно из рис. 3 для отобранных событий.

При меньшей пороговой энергии отобранных частиц (25–100 ГэВ), определяемой по полному энерговыделению в калориметре, полярные области и область экватора демонстрируют отличия величин интенсивности от значений “изотропной” карты. Это связано с эффектом геомагнитного обрезания, оказывающего влияние на угловые

распределения ядер, входящих в состав выборки, пусть и в небольшом проценте событий [10]. На экваторе темп счета ядер меньше, в то время как на полюсах больше. Данный эффект, проявляющийся в отобранных событиях, был учтен при анализе, равно как и остаточный фон протонов высоких энергий, дающий величину анизотропии на уровне 10^{-3} . С учетом фоновой анизотропии от ядер в интервале энергий 25–100 ГэВ также не было найдено достоверной величины анизотропии потоков электронов и позитронов.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ

Обычно анизотропию рассматривают как совокупность компонент, обозначаемых как l [21, 22]. Дипольная анизотропия соответствует $l = 1$. В этом случае величина дипольной анизотропии определяется как

$$\Delta = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}},$$

где $I_{\max}(I_{\min})$ — максимум (минимум) интенсивности суммарного потока электронов и позитронов космических лучей.

Поскольку в результате анализа данных практически десятилетнего периода измерений спектрометра ПАМЕЛА (2006–2016 гг.) анизотропия суммарного потока электронов и позитронов не была обнаружена, были получены следующие значения

для верхних пределов амплитуды крупномасштабной дипольной анизотропии:

для диапазона 25–100 ГэВ — 0.5×10^{-2} ;

для диапазона 100–1000 ГэВ — 2×10^{-2} .

Данные результаты получены после вычитания фона протонов и ядер, вычисленного путем моделирования методом Монте-Карло. На рис. 4 приведены результаты калориметра ПАМЕЛА для верхнего предела дипольной анизотропии суммарных потоков электронов и позитронов в сравнении с результатами других экспериментов.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Целью настоящей работы была попытка зарегистрировать дипольную анизотропию суммарных потоков электронов и позитронов галактических космических лучей в интервале энергий 0.025–1 ТэВ. В результате анализа данных, набранных за почти десятилетний период измерений, удалось лишь установить верхнюю границу для такой анизотропии. Величина найденного предела оказалась расположенной между результатами спутниковых экспериментов АМС-02 и ФЕРМИ, уступая обоим по дискретности энергетического диапазона. Такие близкие источники, как Вела, Геминга или Моногем, могли бы оказать влияние на изотропию наблюдаемых потоков. Однако пока это не обнаружено, а экспериментально установленные верхние пределы на анизотропию суммарных потоков электронов и позитронов, не снимая полностью вопрос о таком влиянии, лишь накладывают определенные ограничения на свободные параметры в моделях генерации космических лучей этими источниками.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-32-00028/18.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. J. Casaus, *Anisotropy of Elementary Particle Fluxes in Primary Cosmic Rays Measured with AMS on the ISS, ICHEP 2018, Seoul*.
2. S. Abdollahi *et al.* (Fermi-LAT Collab.), *Phys. Rev. Lett.* **118**, 091103 (2017).
3. M. Kraus, PhD Thesis, Friedrich-Alexander Univ. (Erlangen, 2018).
4. O. Adriani *et al.* (CALET Collab.), *Phys. Rev. Lett.* **120**, 261102 (2018).
5. J. Chang, G. Ambrosi, Q. An, R. Asfandiyarov, P. Azzarello, P. Bernardini, B. Bertucci, M. S. Cai, M. Caragiulo, D. Y. Chen, H. F. Chen, J. L. Chen, W. Chen, M. Y. Cui, T. S. Cui, A. D'Amone, *et al.* *Astropart. Phys.* **95**, 6 (2017).
6. M. Aguilar *et al.* (AMS Collab.), *Phys. Rev. Lett.* **113**, 121102 (2018).
7. А. В. Карелин, С. А. Воронов, А. М. Гальпер, С. А. Колдобский (от им. Коллаб. ПАМЕЛА), *ЯФ* **78**, 307 (2015) [*Phys. At. Nucl.* **78**, 281 (2015)].
8. А. В. Карелин, С. А. Воронов, А. М. Гальпер, В. В. Малахов, В. В. Михайлов, *ЖЭТФ* **144**, 75 (2013) [*JETP* **117**, 62 (2013)].
9. А. В. Карелин, О. Адриани, Дж. Барбарино, Г. А. Базилевская, Р. Белотти, М. Боецио, Э. А. Богомолов, М. Бонджи, В. Бонвичини, С. Боттаи, А. Бруно, А. Вакки, Е. Вануччини, Г. И. Васильев, С. А. Воронов, А. М. Гальпер и др., *Письма в ЖЭТФ* **101** (5–6), 321 (2013) [*JETP Lett.* **101** (5), 295 (2015)].
10. А. В. Карелин, С. А. Воронов, *ЯФ* **81**, 642 (2018) [*Phys. At. Nucl.* **81**, 721 (2018)].
11. PAMELA Collab. (O. Adriani *et al.*), *Riv. Nuovo Cimento* **40**, 473 (2017).
12. PAMELA Collab. (O. Adriani *et al.*), *Phys. Rev. Lett.* **106**, 201101 (2011).
13. O. Adriani, G. C. Barbarino, G. A. Bazilevskaya, R. Bellotti, M. Boezio, E. A. Bogomolov, L. Bonechi, M. Bonghi, V. Bonvicini, S. Bottai, A. Bruno, F. Cafagna, D. Campana, P. Carlson, M. Casolino, G. Castellini, *et al.*, *Nature* **458**, 07942 (2009).
14. B. Panico, O. Adriani, G. C. Barbarino, G. A. Bazilevskaya, R. Bellotti, M. Boezio, E. A. Bogomolov, M. Bonghi, V. Bonvicini, S. Bottai, A. Bruno, F. Cafagna, D. Campana, P. Carlson, M. Casolino, G. Castellini, *et al.*, *ASTRA Proc.* **2**, 17 (2015).
15. С. В. Борисов, С. А. Воронов, А. М. Гальпер, А. В. Карелин, *ПТЭ*, № 1, 5 (2013) [*Instrum. Exp. Tech.* **56**, 1 (2013)].
16. А. В. Карелин, О. Адриани, Г. С. Барбарино, Г. А. Базилевская, Р. Беллотти, М. Боецио, Е. А. Богомолов, Л. Бонечи, М. Бонджи, В. Бонвичини, С. В. Борисов, С. Боттаи, А. Бруно, Ф. Cafagna, D. Campana, R. Carbone, *et al.*, *J. Phys.: Conf. Ser.* **409**, 012029 (2013).
17. 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, Ф. Cafagna, D. Campana, R. Carbone, P. Carlson, M. Casolino, *et al.*, *J. Phys.: Conf. Ser.* **632**, 012014 (2015).
18. M. Boezio, V. Bonvicini, E. Mocchiutti, P. Schiavon, G. Scian, A. Vacchi, G. Zampa, and N. Zampa, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A* **487**, 407 (2002).
19. G. L. Cassiday, R. Cooper, B. R. Dawson, J. W. Elbert, B. E. Fick, K. D. Green, S. Ko, D. F. Liebing, E. C. Loh, M. H. Salamon, J. D. Smith, P. Sokolsky, P. Sommers, and S. B. Thomas, *Phys. Rev. Lett.* **62**, 383 (1989).
20. T.-P. Li and Y.-Q. Ma, *Astrophys. J.* **272**, 317 (1983).
21. A. R. Edmonds, *Angular Momentum in Quantum Mechanics* (Princeton Univ. Press, 1996).
22. K. M. Gorski, E. Hivon, A. J. Banday, B. D. Wandelt, F. K. Hansen, M. Reinecke, and M. Bartelmann, *Astrophys. J.* **622**, 759 (2005).

THE UPPER LIMIT FOR THE AMPLITUDE OF THE DIPOLE ANISOTROPY OF THE TOTAL FLUX OF COSMIC RAY ELECTRONS AND POSITRONS WITH ENERGIES FROM 25 GeV UP TO 1 TeV

A. V. Karelin, S. A. Voronov
(on behalf of the Collab. PAMELA)

National Research Nuclear University "MEPhI", Moscow, Russia

The work is dedicated to the search for the anisotropy of total fluxes of electrons and positrons of high-energy galactic cosmic rays. For the analysis, we used the data of the magnetic spectrometer PAMELA launched into Earth orbit in June 2006 and functioning on it until 2016. The main selection of events and determination of the arrival directions of particles was carried out by using a position-sensitive microstrip calorimeter. The neutron detector was used for the additional suppression of the background of protons and nuclei. As a result of the analyses over a practically decade-long measurement period, the upper limits of the amplitude for the dipole anisotropy of the total fluxes of electrons and positrons were established for two energy ranges: 25–100 GeV and 100 GeV–1 TeV. These results complement the data of other satellite experiments AMC-02 and FERMI.