

УДК 524.1

## РЕГИСТРАЦИЯ АНТИПРОТОНОВ В РАДИАЦИОННОМ ПОЯСЕ ЗЕМЛИ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ ПАМЕЛА

© 2021 г. С. А. Роденко<sup>1</sup>, \*, А. Г. Майоров<sup>1</sup>, В. В. Малахов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
“Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, Россия

\*E-mail: SARodenko@mephi.ru

Поступила в редакцию 19.10.2020 г.

После доработки 19.11.2020 г.

Принята к публикации 28.12.2020 г.

Магнитный спектрометр ПАМЕЛА на борту космического аппарата Ресурс-ДК1 измерял потоки заряженных частиц и античастиц в космическом излучении с июня 2006 до января 2016 г. В 2011 году по результатам измерений были впервые обнаружены антипротоны вторичного происхождения в околоземном пространстве и определен энергетический спектр альбедной и захваченной компонент в энергетическом диапазоне от 60 до 750 МэВ. Приводятся результаты измерения потока антипротонов в радиационном поясе Земли по данным эксперимента ПАМЕЛА, полученным за весь период его проведения, с использованием усовершенствованных алгоритмов обработки данных и выделения событий.

DOI: 10.31857/S0367676521040323

### ВВЕДЕНИЕ

Изучение потоков заряженных частиц в околоземном космическом пространстве является одной из важнейших научных задач, связанных с исследованием механизмов генерации вторичных частиц, их захвата, движения и энергетических потерь в различных областях магнитосферы, а также расчета радиационной обстановки. Основным механизмом наполнения радиационных поясов является распад нейтронов альбеда. Согласно так называемому процессу CRAND (распад нейтронов альбеда космических лучей) [1, 2] часть вторичных нейтронов покидает атмосферу и распадается в магнитосфере Земли на протоны, которые могут оказаться захваченными. Механизмы генерации потоков вторичных частиц распространяются на образование и захват магнитным полем Земли античастиц. В частности, для антинейтронов и антипротонов справедлив механизм CRANbarD аналогично механизму CRAND, а также не исключается процесс генерации антипротонов от прямого рождения протон-антипротонных пар в атмосфере [3, 4].

В 2011 г. по результатам измерений эксперимента ПАМЕЛА были впервые обнаружены вторичные антипротоны, в т.ч. захваченные во внутреннем радиационном поясе и измерен их энергетический спектр в энергетическом диапазоне от 60 до 750 МэВ [5]. В данной работе был получен улучшенный результат с применением усовершенствованных алгоритмов обработки экспери-

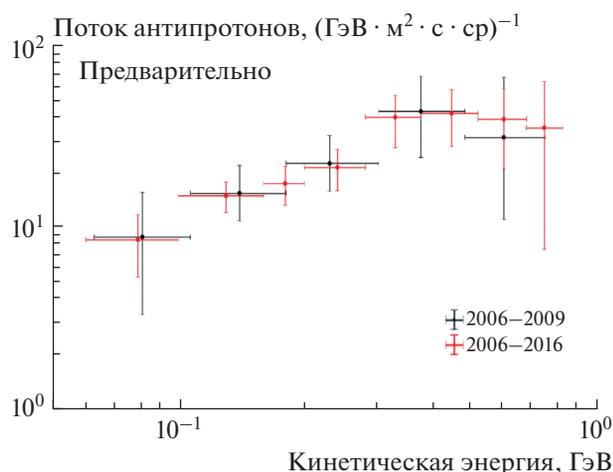
ментальных данных, полученных за весь период проведения эксперимента ПАМЕЛА.

### ЭКСПЕРИМЕНТ ПАМЕЛА

Спутник Ресурс-ДК1 со спектрометром ПАМЕЛА на борту был запущен на орбиту 15 июня 2006 г. и проработал до января 2016 г. Прибор ПАМЕЛА состоит из набора детекторных систем (системы антисовпадений, времяпролетной и магнитной трековой системы, калориметра, нейтронного и сцинтилляционного ливневого детектора), предназначенных для идентификации типа частицы (электронов и позитронов, антипротонов, изотопов водорода и ядер гелия, более тяжелых ядер), измерения величины и знака заряда, жесткости, скорости и энергии частиц. Подробное описание научной аппаратуры и условий проведения эксперимента можно найти в работе [6].

### ИДЕНТИФИКАЦИЯ АНТИПРОТОНОВ

Особенность работы заключается в преимущественном использовании информации от калориметра прибора ПАМЕЛА, эффективность которого на протяжении всего полета оставалась постоянной, что позволит включить в анализ как можно больше событий. Для создания методики восстановления треков частиц и античастиц в калориметре было проведено моделирование низкоэнергетических антипротонов, останавливающихся и аннигилирующих в веществе этого детектора с помощью программы на основе Geant4,



**Рис. 1.** Поток антипротонов в радиационном поясе по данным эксперимента ПАМЕЛА.

разработанной коллаборацией PAMELA. Алгоритм восстановления треков основан на методах компьютерного зрения и обработки цифровых изображений, построенных из отклика всех стрипов calorimetра. Благодаря этому удалось восстановить траекторию влетающего в calorimetр антипротона, треки вторичных частиц в топологии типа “звезда”, точку остановки и другие параметры взаимодействия. Подробное описание метода восстановления треков антипротонов описано в статье [7].

Идентификация антипротонов проводилась при помощи многомерного анализа данных, основанного на признаках, характеризующих процесс аннигиляции. Подробно он описан в статье [8].

## РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 1 приведены зависимости потока антипротонов во внутреннем радиационном поясе от кинетической энергии, полученные ранее (крести-

ки) [5] и в рамках данной работы (точки). Увеличение статистики позволило уменьшить погрешности на графике, сделать уже энергетические интервалы и немного расширить энергетический диапазон. Следует отметить, что использованная в данной работе методика отличается от использованной в публикации 2011 г., тем самым независимо подтверждая предыдущий результат.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе приводятся предварительные результаты измерения дифференциального энергетического спектра антипротонов во внутреннем радиационном поясе по данным эксперимента ПАМЕЛА при обработке научной информации полученной за 2006–2016 гг. Благодаря рассмотрению всего объема данных и использованию усовершенствованных алгоритмов анализа и идентификации событий удалось увеличить статистику зарегистрированных антипротонов и расширить энергетический диапазон наблюдений.

Исследование выполнено за счет средств Российского научного фонда (проект № 19-72-10161).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Gordon C.W., Canuto V., Axford W.I. et al.* The Earth: 1 – The upper atmosphere, ionosphere and magnetosphere. V. 1. N.Y.: Gordon & Breach, 1978. P. 303.
2. *Albert J.M., Ginet G.P., Gussenhoven M.S.* // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103. No. 5A. P. 9261.
3. *Fuki M.* // *Int. J. Mod. Phys.* 2005. V. 20. No. 29. P. 6739.
4. *Selesnick R.S., Looper M.D., Mewaldt R.A. et al.* // *Geophys. Res. Lett.* 2007. V. 34. P. 20.
5. *Adriani O., Barbarino G., Bazilevskaya G.A. et al.* // *Astrophys. J.* 2011. V. 737. L. 29. P. 5.
6. *Picozza P., Galper A.M., Castellini G. et al.* // *Astropart. Phys.* 2007. V. 27. P. 296.
7. *Роденко С.А., Майоров А.Г., Малахов В.В. и др.* // *Яд. физ. и инж.* 2018. Т. 9. № 5. С. 466.
8. *Malakhov V.V., Mayorov A.G., Rodenko S.A.* // *J. Phys. Conf. Ser.* 2017. V. 798. No. 1. Art. No. 012020.

## Antiprotons registration in the Earth’s radiation belt in the PAMELA experiment

S. A. Rodenko<sup>a,\*</sup>, A. G. Mayorov<sup>a</sup>, V. V. Malakhov<sup>a</sup>

<sup>a</sup>National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

\*e-mail: SARodenko@mephi.ru

The PAMELA magnetic spectrometer on board the Resurs-DK1 spacecraft measured the fluxes of charged particles and antiparticles in cosmic radiation from June 2006 to January 2016. In 2011, according to the results of measurements, antiprotons of secondary origin were detected for the first time in near-Earth space, and the energy spectrum of the albedo and captured components cosmic rays was measured in the energy range from 60 to 750 MeV. We present the results of measuring the flux of antiprotons in the inner radiation belt of the Earth according to the data of the PAMELA experiment, obtained over the entire period of its operation using improved algorithms for processing and identification events.