

УДК 53.043

ИЗМЕРЕНИЕ ПОТОКОВ ПРОТОНОВ ПРЯМОГО И ВОЗВРАТНОГО АЛЬБЕДО В ЭКСПЕРИМЕНТЕ РАМЕЛА

© 2021 г. О. А. Голуб¹*, А. Г. Майоров¹

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

*E-mail: ogolub394@gmail.com

Поступила в редакцию 19.10.2020 г.

После доработки 19.11.2020 г.

Принята к публикации 28.12.2020 г.

При помощи моделирования прохождения частиц через прибор РАМЕЛА в среде Geant 4 выбраны критерии отбора для идентификации протонов прямого и возвратного альbedo. Полученные критерии применены к экспериментальным данным РАМЕЛА и после проведенной обработки и анализа восстановлены дифференциальные энергетические спектры протонов прямого и возвратного альbedo для низких и высоких геомагнитных широт.

DOI: 10.31857/S0367676521040116

ВВЕДЕНИЕ

Частицы альbedo образуются в результате взаимодействий первичных высокоэнергичных космических лучей с ядрами атомов остаточной атмосферы Земли. Полученные вторичные заряженные частицы движутся вдоль магнитных силовых линий в двух направлениях: к Земле – возвратное альbedo и от Земли – прямое альbedo [1].

Частицы альbedo широко изучаются с 1950-х гг., но до сих пор существует множество нерешенных проблем, которые сохраняют научный интерес к этой теме. Измерения потоков протонов альbedo проводились на аэростатах [2], космических аппаратах и искусственных спутниках Земли (ИСЗ) [3, 4]. Экспериментальные данные NINA и NINA-2 представляют информацию о потоках вторичных протонов в области низких энергий от 10 до 35 МэВ. Наоборот, в эксперименте AMS-01 измерены потоки протонов прямого и возвратного альbedo энергий области пenumбры на разных геомагнитных широтах. Тем не менее, этих экспериментальных данных недостаточно для полного понимания процессов образования частиц альbedo в атмосфере и их движения в магнитном поле Земли. Международный научный спутниковый эксперимент РАМЕЛА [5], предназначенный для изучения потоков заряженных частиц в космическом излучении, дает возможность провести независимые прецизионные измерения потоков протонов прямого и возвратного альbedo в широком энергетическом диапазоне в различных областях околоземного пространства.

ЭКСПЕРИМЕНТ РАМЕЛА

С июня 2006 г. до января 2016 г. на околоземной орбите проводился эксперимент РАМЕЛА, который был основан на магнитном спектрометре и проводил измерения потоков космических лучей различного типа в широком диапазоне энергий (от нескольких сотен МэВ до ~1 ТэВ). Прибор РАМЕЛА включает в себя набор детекторов [6–12], общая совокупность которых позволяет исключать фоновые события, определение характеристик которых затруднено или невозможно.

Задачей магнитного спектрометра является измерение координат точек прохождения ионизирующей частицы внутри магнита и ионизационных потерь вдоль трека. С их помощью восстанавливается траектория, по кривизне которой определяется жесткость (отношение импульса частицы к заряду) и знак заряда частиц. Зависимость ионизационных потерь от жесткости позволяет определять абсолютную величину заряда частицы.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИБОРА РАМЕЛА В СРЕДЕ GEANT4

Основной целью работы является восстановление дифференциальных энергетических спектров протонов прямого и возвратного альbedo. Для этого необходимо подобрать критерии для отбора таких частиц. Подбор критериев проводился с помощью моделирования методом Монте-Карло прохождения частиц через спектрометр РАМЕЛА в программном обеспечении, написанном и применяемом в коллаборации РАМЕЛА на основе GEANT4 [13]. Необходимо выделить не-

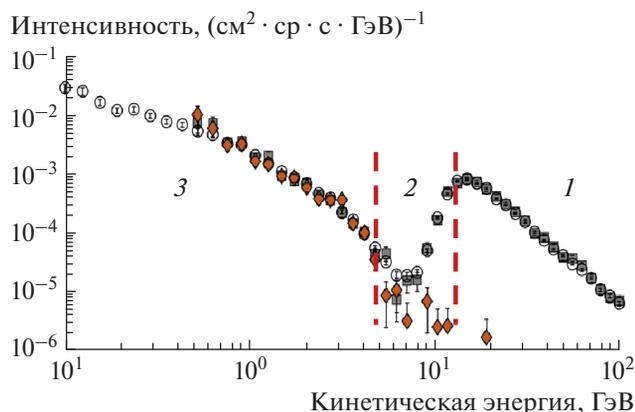


Рис. 1. Дифференциальные энергетические спектры протонов прямого и возвратного альbedo, а также ГКЛ по данным эксперимента PAMELA для области геомагнитного экватора ($0 < |\theta_M| < 0.35$). Обозначения: \circ – базовые критерии отбора (для частиц, летящих сверху), \square – Дополнительные критерии отбора (для частиц, летящих сверху), \diamond – для частиц, летящих снизу.

взаимодействующие в спектрометре частицы, отобрать из них протоны (одиночный положительный заряд) и определить направление прилета. Исключение фоновых событий и выделение “чистого” трека необходимо из-за того, что при взаимодействиях частица теряет некоторую долю энергии или превращается в другие типы, что вызывает сложности в определении ее начальных параметров, особенно для частиц летящих снизу, на пути которых перед трековой системой расположен калориметр. В зависимости от того, с какой стороны прилетела частица (сверху или снизу), путь от момента попадания в прибор до регистрации трековой системой различен. В связи с этим и критерии отбора для таких частиц будут отличаться. Для выделения летящих сверху вниз частиц были подобраны базовые критерии отбора (1.1–1.4):

1.1. в трековой системе идентифицирован 1 трек, не касающийся стенок магнита;

1.2. траектория в трековой системе восстановлена с использованием 4-х и более точек в отклоняющей проекции X, 3-х и более точек в ортогональной проекции Y;

1.3. отсутствует сигнал во всех счетчиках системы антисовпадений;

1.4. в каждой из 6 плоскостей время-пролетной системы не более 1-го сработавшего сцинтилляционного счетчика.

Критерии отбора 1.1 и 1.2 позволяют исключить из анализа события с заведомо неправильно измеренными характеристиками. Критерии 1.3 и 1.4 позволяют отсеять “ложные” триггеры, вызванные вторичными частицами, образованными во взаимодействиях космических лучей с веществом прибора.

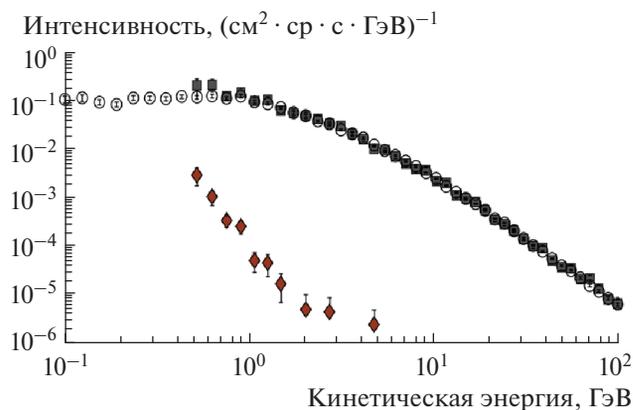


Рис. 2. Дифференциальные энергетические спектры протонов прямого и возвратного альbedo, а также ГКЛ по данным эксперимента PAMELA для приполярных областей ($|\theta_M| > 1$). Обозначения: \circ – базовые критерии отбора (для частиц, летящих сверху), \square – Дополнительные критерии отбора (для частиц, летящих сверху), \diamond – для частиц, летящих снизу.

Для выделения частиц летящих снизу вводятся дополнительные критерии отбора для отсекаания взаимодействий в калориметре. Далее полученные критерии отбора применены к экспериментальным данным.

ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

На основании обработки экспериментальных данных спектрометра PAMELA, собранных в период работы с июля 2006 по март 2007 г., отобраны протоны прямого и возвратного альbedo, и построены спектры для различного диапазона геомагнитных широт (θ_M). Погрешности на графиках являются статистическими, систематические ошибки в работе не оценивались.

На рис. 1 изображены спектры протонов прямого и возвратного альbedo, и галактических космических лучей (ГКЛ), восстановленные по данным эксперимента PAMELA в области геомагнитного экватора ($0 < |\theta_M| < 0.35$)

Область 1 на графике соответствует частицам с жесткостью больше жесткости геомагнитного обреза — это галактические космические лучи. В области 2 проникновение галактических частиц осложнено — это область пенумбры. Наконец, в области 3 проникновение галактических частиц запрещено, и регистрируемые здесь события относятся к частицам возвратного альbedo. Следует отметить, что спектры возвратного альbedo, измеренного при разных критериях отбора, согласуются между собой. Спектры прямого и возвратного альbedo согласуются между собой в области 3, как и ожидалось. Так как галактические частицы не могут прилететь в направлении “от Земли”, в

области 2 удалось измерить непосредственно поток частиц прямого альбеда.

На рис. 2 представлены дифференциальные энергетические спектры протонов прямого и возвратного альбеда для высоких геомагнитных широт ($|\theta_m| > 1$). На высоких широтах выделить потоки возвратного альбеда с прибором, ориентированным в только космос, невозможно, поскольку они “тонут” в потоке галактических космических лучей. Регистрация прибором PAMELA частиц, прилетающих в направлении от Земли, и созданная в работе методика позволяют восстановить спектр частиц альбеда даже в приполярных областях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе создана методика идентификации протонов прямого альбеда в эксперименте PAMELA, которая применена к экспериментальным данным, накопленным в период работы с июля 2006 до марта 2007 г. Восстановлены дифференциальные энергетические спектры протонов прямого и возвратного альбеда в различных диапазонах геомагнитных широт. Результаты, полученные разными критериями отбора событий, согласуются между собой, подтверждая достоверность результатов. На высоких геомагнитных широтах, где доминирует галактическое излучение, также восстановлен дифференциальный энергетический спектр протонов альбеда.

В дальнейшем будет проведено детальное исследование пространственного распределения частиц альбеда (уменьшение диапазона по гео-

магнитной широте, введение разбиения по геомагнитной долготе), увеличение статистики обработкой большого объема научной информации, а также будет проведено сравнение с данными других экспериментов.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 19-72-10161).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Treiman S.B.* // Phys. Rev. 1953. V. 91. P. 957.
2. *Verma S.D.* // J. Geophys. Res. 1967. V. 72. P. 915.
3. *AMS Collaboration* // Phys. Lett. B. 2000. V. 472. P. 215.
4. *Bidoli V., Casolino M., Pascale De et al.* // Ann. Geophys. 2002. V. 20. P. 1693.
5. *Picozza P., Galper A.M., Castellini G. et al.* // Astropart. Phys. 2007. V. 27. P. 296.
6. *Adriani O., Bonechi L., Bongi M. et al.* // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A. 2007. V. 572. P. 471.
7. *Picozza P., Galper A.M., Castellini G. et al.* // Astropart. Phys. 2007. V. 27. P. 296.
8. *Osteria G., Barbarino G., Campana D. et al.* // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A. 2004. V. 518. P. 161.
9. *Russo S., Barbarino G., Campana D. et al.* // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A. 2007. V. 572. P. 495.
10. *Straulino S., Adriani O., Bonechi L. et al.* // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A. 2006. V. 556. P. 100.
11. *Ricciarini S. (PAMELA collaboration)* // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A. 2007. V. 582. P. 892.
12. *Boezio M., Albi M., Bonvicini V. et al.* // Astropart. Phys. 2006. V. 26. P. 111.
13. *Agostinellia S., Allisonas J., Amakoe K. et al.* // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. 2003. V. A506. P. 250.

Measurement of the splash and reentrant albedo proton flux in the PAMELA experiment

O. A. Golub^{a,*}, A. G. Mayorov^a

^aNational Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia

*e-mail: ogolub394@gmail.com

With the help of simulation the passage of particles through the PAMELA device in the Geant 4 environment, the selection criteria for of splash albedo protons identification and reentrant albedo protons identification were chosen. The developed criteria were applied to the PAMELA experimental data and after the processing and analysis the differential energy spectra of the protons of the direct and return albedo were obtained for low and high geomagnetic latitudes.