

УДК 524.1-352

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПОИСКА ЯДЕР ГЕЛИЯ В СОЛНЕЧНЫХ ЭНЕРГИЧНЫХ СОБЫТИЯХ ПО ДАННЫМ ЭКСПЕРИМЕНТА PAMELA

© 2023 г. Д. В. Павленко¹, *, С. А. Роденко¹ от имени коллаборации PAMELA

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

*E-mail: pdv017@campus.mephi.ru

Поступила в редакцию 25.12.2022 г.

После доработки 12.02.2023 г.

Принята к публикации 29.03.2023 г.

Обсуждаются предварительные результаты анализа данных научного эксперимента PAMELA, в частности, восстановления энергетических спектров солнечных энергичных частиц — ядер гелия во время вспышек и корональных выбросов масс за период с 2006 по 2016 год. PAMELA — международный космический эксперимент, основной задачей которого является измерение спектров частиц и античастиц в космическом излучении в широком диапазоне энергий, в том числе солнечных энергичных частиц. С помощью данных эксперимента возможен анализ потоков солнечных частиц в диапазоне от ~80 МэВ до нескольких ГэВ. Для восстановления спектров ядер гелия разработаны методы идентификации частиц и оценки эффективности отбора.

DOI: 10.31857/S036767652370179X, EDN: OSLACR

ВВЕДЕНИЕ

Солнечные энергичные частицы (СЭЧ) генерируются на Солнце в мощных взрывных процессах. Главными механизмами ускорения СЭЧ являются: ускорение на фронтах ударных волн, стохастическое ускорение и ускорение в электрическом поле, возникающее при пересоединении силовых линий солнечного магнитного поля. Ускорение СЭЧ может происходить в месте возникновения вспышки, солнечной короне и в межпланетном пространстве. СЭЧ представляют опасность для космонавтов и научной аппаратуры в околоземном космическом пространстве. Наиболее интенсивные события СЭЧ вызывают атмосферные ливни, вторичные продукты которых регистрируют наземные детекторы: нейтронные мониторы, мюонные годоскопы и ионизационные камеры.

Благодаря прецизионным измерениям эксперимента PAMELA, получены экспериментальные данные СЭЧ в широком диапазоне энергий, что позволяет лучше понять механизмы рождения и ускорения СЭЧ. С помощью экспериментальных данных PAMELA, ранее был проведен поиск протонов [1, 2] и нейтронов [3] солнечного происхождения, а также детальный анализ солнечных событий 13–14 декабря 2006 г., в которых были зарегистрированы ядра гелия [4]. В данной работе проводился поиск ядер гелия в других сол-

нечных событиях, зарегистрированных экспериментом PAMELA.

ЭКСПЕРИМЕНТ PAMELA

Эксперимент PAMELA — международный эксперимент на российском спутнике Ресурс-ДК1. Эксперимент проводился с июня 2006 г. по конец января 2016 г. Основными задачами эксперимента являлись: изучение характеристик потока частиц и античастиц галактических космических лучей (ГКЛ), регистрация высокоэнергичных частиц в солнечных вспышках и исследование вторичных космических лучей в околоземном космическом пространстве [5–8]. Для решения поставленных задач эксперимент включал в себя набор детекторов, позволяющих измерять различные характеристики частиц [9].

Отбор частиц, попадающих в апертуру прибора, проводился с помощью базовых критериев. Отбор ядер гелия проводился с помощью измеренных значений ионизационных потерь и магнитной жесткости в трековой системе. Также, для отбора при жесткости $R < 1$ ГВ использовалась зависимость ионизационных потерь от скорости частицы по данным времяпролетной системы. Основным критерием отбора являлись характеристические линии, ограничивающие область нахождения ядер гелия (рис. 1). Также для отбора

были использованы значения энерговыделения в первой плоскости калориметра в зависимости от значений магнитной жесткости в трековой системе.

Затем проводилась оценка эффективности отбора — отношения числа событий, прошедших через все критерии отбора всех систем к числу событий, прошедших через критерии одной системы. Для определения эффективности отбора по каждому детектору использовались экспериментальные данные с других детекторов. Подробное описание методики оценки эффективности отбора приведено в работе [10].

Выделение галактической компоненты космических лучей основывалось на аппроксимации закона Штермера. Для этого использовалось условие: $R > aR_c$, где R — абсолютная величина измеренной жесткости для каждого события, R_c — локальная жесткость геомагнитного обрезания на высоте пролета эксперимента PAMELA, значение $a = 1.23$ необходимо для надежного отделения компоненты ГКЛ. Значение R_c вычислялось по координатам Мак-Илвайна, которое однозначно определяется из модели магнитного поля Земли IGRF и положения спутника. В работе рассматривался диапазон энергий от 80 МэВ до нескольких ГэВ.

РЕЗУЛЬТАТЫ

С помощью критериев отбора для ядер гелия был проведен отбор экспериментальных данных PAMELA и анализ солнечных событий. В статье [1] представлен список вспышек, в которых удалось зарегистрировать повышенный темп счета протонов в период с июля 2006 г. по сентябрь 2014 г.

Первоначально для всех событий были восстановлены темпы счета частиц от времени. Для определения начала времени регистрации события и его продолжительности темпы счета строились за несколько дней. Всего было обработано 30 событий из статьи [1]. Для поиска возможных солнечных энергичных событий без ускорения протонов был также проведен анализ данных GOES [11] за 2011–2014 г.

Повышенный темп счета гелия по результатам проведенного анализа был зарегистрирован в следующие временные интервалы: 27.01–01.02.2012, 13.03–15.03.2012, 17.05–19.05.2012, 06.01–07.01.2014, 25.02–03.03.2014. Для этих событий восстановлены интегральные энергетические спектры ядер гелия (рис. 2). Для сравнения на график добавлены также спектры протонов за тот же временной диапазон. Подробный анализ солнечных событий приведен в статье [1]. Перед построением спектров проводилась процедура выделения ядер гелия от фонового потока ГКЛ.

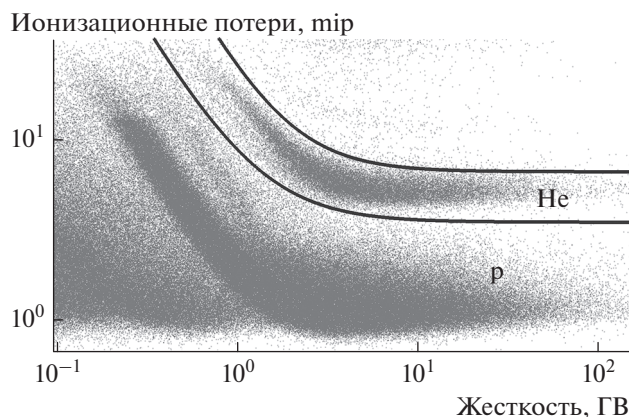


Рис. 1. Зависимость средних ионизационных потерь от жесткости частицы для ноября 2006 г. По оси X — жесткость частицы, измеренная трековой системой. По оси Y — средние ионизационные потери частицы в трековой системе.

Интегральные спектры гелия СКЛ были аппроксимированы двумя функциями:

1. функция Эллисон и Рамати (E–P) [12]:

$$A = b \left(\frac{E}{E_s} \right)^{-\gamma} \exp \left(\frac{-E}{E_0} \right),$$

где γ — спектральный индекс, E_s — энергетический порог регистрации ядер гелия, E_0 — энергия отсечки при которой прекращается ускорение частиц. Этот степенной закон можно интерпретировать в терминах степени сжатия ударной волны, а энергия отсечки является отражением предела ускорения процесса.

2. степенной закон:

$$A = bE^{-\gamma},$$

где E — энергия, γ — спектральный индекс. Закон характеризует ускорение космических лучей на ударной волне ускорением Ферми.

Аппроксимация экспериментальных данных выполнялась с помощью метода наименьших χ^2 . Отклонения параметров аппроксимации γ_1, γ_2, E_0 соответствуют квадратному корню из диагонального элемента ковариационной матрицы. Используемый уровень значимости $\alpha = 0.05$. Полученные спектральные показатели сведены в табл. 1.

При низких энергиях (<0.5 ГэВ) интегральный спектр отклоняется от степенного закона, поэтому для описания таких энергий используют комбинированную зависимость, состоящую из степенной функции и экспоненты.

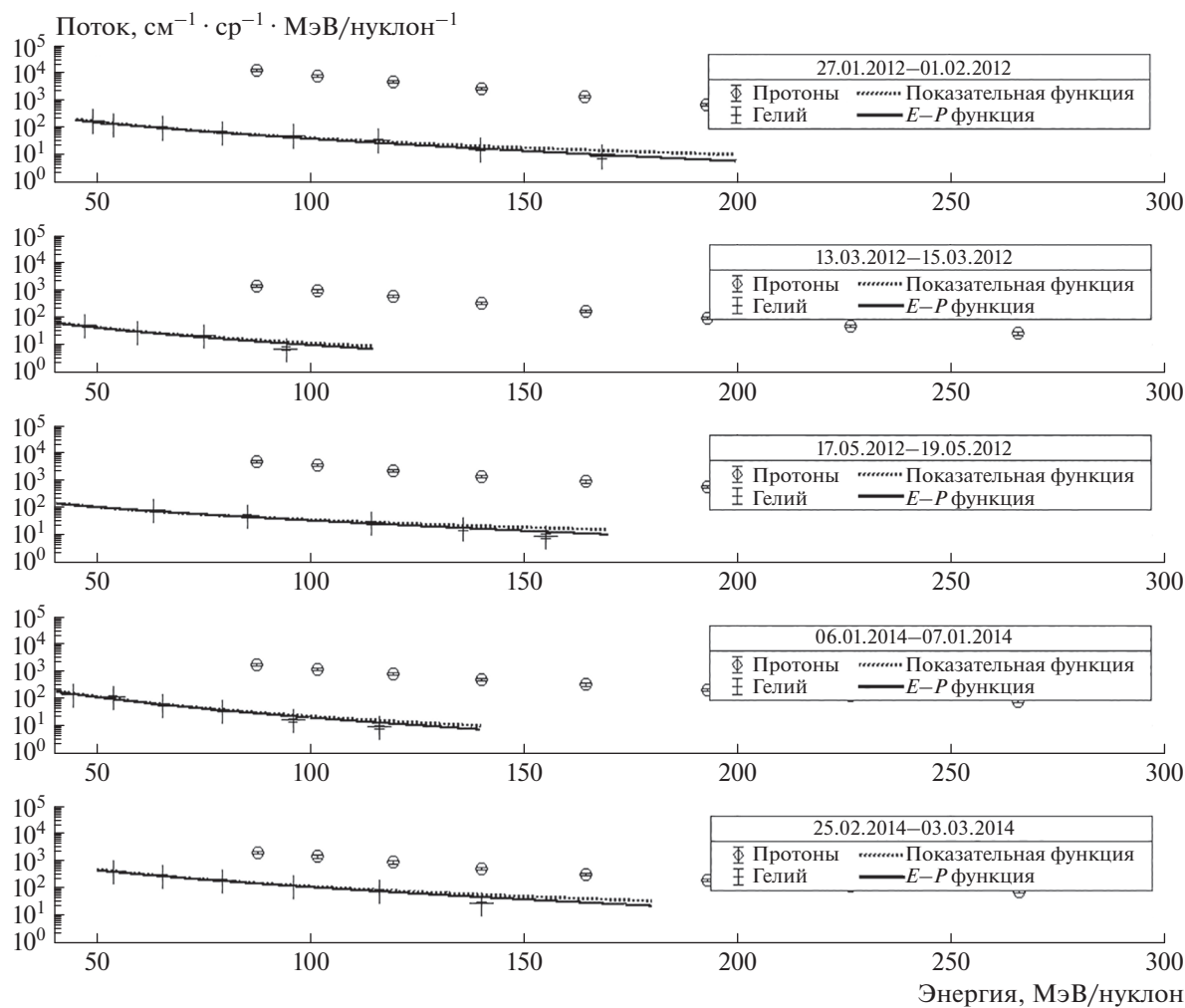


Рис. 2. Интегральные энергетические спектры ядер гелия для 5 зарегистрированных событий СЭЧ в хронологическом порядке. На графике показаны протоны [1], ядра гелия, фитирование функцией $E-P$ и степенной функцией.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, восстановлены дифференциальные энергетические и интегральные спектры ядер гелия по данным эксперимента PAMELA в диапазоне энергий от 80 МэВ до нескольких ГэВ.

Для этого разработаны критерии отбора ядер гелия, обработаны экспериментальные данные в период с 2006 года по 2014 год. Повышенная интенсивность регистрации ядер гелия найдена в пяти крупных солнечных событиях, сопровож-

Таблица 1. Спектральные показатели для каждого события. γ_1 , χ^2_1 – спектральный индекс и хи-квадрат степенной функции, γ_2 , χ^2_2 – спектральный индекс и хи-квадрат функции $E-P$, E_0 – энергия отсечки

№	Событие	γ_1	χ^2_1	γ_2	E_0	χ^2_2	Класс вспышки по данным GOES
1	27.01–01.02.2012	1.99 ± 0.18	3.17	1.69 ± 0.07	700 ± 425	2.98	X1.7
2	13.03–15.03.2012	2.19 ± 0.29	2.29	1.51 ± 0.67	312 ± 168	1.44	X5.4
3	17.05–19.05.2012	1.78 ± 0.23	1.34	1.34 ± 0.21	500 ± 303	0.98	M5.1
4	06.01–07.01.2014	2.79 ± 0.34	1.57	1.52 ± 0.35	118 ± 53	0.64	X3.5
5	25.02–03.03.2014	1.05 ± 0.41	1.05	1.47 ± 1.05	306 ± 207	0.60	X4.9

денных высокоэнергичными протонами: (>1 ГэВ): 27.01–01.02.2012, 13.03–15.03.2012, 17.05–19.05.2012, 06.01–07.01.2014, 25.02–03.03.2014.

Авторы выражают благодарность Колдобскому Сергею Александровичу за курирование научной деятельности, оказанную поддержку и созданную благоприятную атмосферу для проведения исследований. Работа по идентификации частиц, расчету эффективности и восстановлению спектров гелия была выполнена П.Д. при поддержке Российского научного фонда (проект № 20-72-10170). Работа по геомагнитному отбору частиц галактического и солнечного происхождения была выполнена Р.С. при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект “Фундаментальные проблемы космических лучей и темная материя” № 0723-2020-0040).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bruno A., Bazilevskaya G.A., Boezio M. et al. // *Astrophys. J.* 2018. V. 862. No. 2. P. 97.
2. Базилевская Г.А., Майоров А.Г., Малахов В.В. и др. // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2013. Т. 77. № 5. С. 557; *Bazilevskaya G.A., Mayorov A.G., Malakhov V.V. et al.* // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2013. V. 77. No. 5. P. 157.
3. Богомолов Э.А., Адриани О., Базилевская Г.А. и др. // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2017. Т. 81. № 2. С. 151; *Bogomolov E.A., Adriani O., Bazilevskaya G.A. et al.* // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2017. V. 81. No. 2. P. 132.
4. Adriani O., Barbarino G.C., Bazilevskaya G.A. et al. // *Astrophys. J.* 2011. V. 742. No. 2. P. 102.
5. Майоров А.Г., Адриани О., Базилевская Г.А. и др. // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2011. Т. 75. № 6. С. 828; *Mayorov A.G., Adriani O., Bazilevskaya G.A. et al.* // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2011. V. 75. No. 6. P. 779.
6. Лагойда И.А., Михайлов В.В., Воронов С.А., Нгобени М.Д. // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2021. Т. 85. № 11. С. 1615; *Lagoida I.A., Mikhailov V.V., Voronov S.A., Ngoben M.D.* // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2021. V. 85. No. 11. P. 1276.
7. Троицкая И.К., Майоров А.Г., Малахов В.В. и др. // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2019. Т. 83. № 5. С. 635; *Troitskaya I.K., Mayorov A.G., Malakhov V.V. et al.* // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2019. V. 83. No. 5. P. 576.
8. Юлбарисов Р.Ф., Галикян Н.Г., Майоров А.Г. и др. // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2021. Т. 85. № 11. С. 1611; *Yulbarisov R.F., Galikyan N.G., Mayorov A.G. et al.* // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2021. V. 85. No. 11. P. 1272.
9. Picozza P., Galper A.M., Castellini G. et al. // *Astropart. Phys.* 2007. V. 27. No. 4. P. 296.
10. Колдобский С.А. Спектры дейтронной компоненты космического излучения в окрестности Земли. Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Москва: НИЯУ МИФИ, 2015. 125 с.
11. <https://www.ngdc.noaa.gov/stp/satellite/goes/dataaccess.html>.
12. Ellison D.C., Ramaty R. // *Astrophys. J.* 1985. V. 298. P. 400.

Preliminary results of the search for helium nuclei in solar energetic events measured in the PAMELA experiment

D. V. Pavlenko^a *, S. A. Rodenko^a on behalf of the PAMELA collaboration

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

*e-mail: pdv017@campus.mephi.ru

We presented the preliminary results of the search for helium nuclei in solar energetic events measured in the PAMELA experiment in the rigidity range from 0.1 to 1 GV from 2006 to 2014. We constructed selection criteria for helium nuclei and estimated their efficiency. The spectra are approximated using a simple power-law function and functional form based on Ellison-Ramaty, consisting of a power-law spectrum modulated by an exponential.