

УДК 524.1

ВРЕМЕННЫЕ ВАРИАЦИИ ПОТОКА ЯДЕР ЛИТИЯ В ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧАХ С 2006 ПО 2014 гг. ПО ДАННЫМ ЭКСПЕРИМЕНТА РАМЕЛА

© 2021 г. А. А. Елифанов¹, *, А. Г. Майоров¹

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

*E-mail: aerifanov.inbox@gmail.com

Поступила в редакцию 19.10.2020 г.

После доработки 19.11.2020 г.

Принята к публикации 28.12.2020 г.

Впервые приводятся предварительные результаты измерения временной динамики дифференциальных энергетических спектров ядер лития галактического происхождения в диапазоне жесткостей 0.5–100 ГВ в период с 2006 по 2014 гг. с годовым усреднением по данным эксперимента РАМЕЛА. Для этого составлены критерии отбора ядер лития, произведена оценка их эффективности, определена светосила прибора. Поведение полученных спектров согласуется с изменениями солнечной активности в рассматриваемом интервале времени.

DOI: 10.31857/S0367676521040104

ВВЕДЕНИЕ

По современным представлениям распространение космических лучей (КЛ) в гелиосфере определяется процессами диффузии и дрейфа в магнитном поле, конвекцией в плазме солнечного ветра, адиабатическими потерями энергии и дополнительным ускорением. Все эти механизмы зависят как от солнечной активности, так и от типа частицы. Как следствие, происходит изменение энергетического спектра галактических космических лучей (ГКЛ) при прохождении через гелиосферу, что особенно заметно в области низких энергий (при жесткости до нескольких десятков ГВ). Это явление называется солнечной модуляцией космических лучей [1].

На данный момент по результатам измерений в эксперименте РАМЕЛА уже опубликованы временные вариации потоков протонов (диапазон жесткостей 0.4–50 ГВ) [2–4] и ядер гелия (0.8–50 ГВ) [2, 5]. В настоящей работе исследуются долговременные вариации потоков ядер лития по данным эксперимента РАМЕЛА с 2006 по 2014 гг. в диапазоне жесткостей от ~0.5 до 100 ГВ.

Следует отметить, что непрерывные измерения потоков ядер с $Z > 2$ длительностью порядка нескольких лет на сегодняшний день отсутствуют, несмотря на то, что представляют интерес, как дополнительный источник информации о переносе КЛ в гелиосфере.

ЭКСПЕРИМЕНТ РАМЕЛА И КРИТЕРИИ ОТБОРА ЯДЕР ЛИТИЯ

Эксперимент РАМЕЛА [6, 7] проводился с июня 2006 по январь 2016 г. на околоземной орби-

те. Прибор РАМЕЛА был предназначен для прецизионных измерений потоков заряженной компоненты космических лучей. В задачи эксперимента входило изучение характеристик потоков частиц и античастиц ГКЛ, исследование эффектов солнечной модуляции, регистрация частиц в высокоэнергичных солнечных вспышках и изучение вторичных КЛ в околоземном пространстве. Для этого прибор включает в себя набор детекторов, позволяющих измерять такие характеристики частиц, как магнитная жесткость R , скорость β , ионизационные потери dE/dx .

В работе для выделения частиц, попадающих в апертуру прибора и для которых были измерены все характеристики, использовались базовые критерии, приведенных в параграфе 3.1 статьи [3].

Для отбора ядер лития использовались измеренные в трековой системе [8] значения ионизационных потерь dE/dx и магнитной жесткости R частицы. Основным критерием отбора по заряду являются две характеристические линии на зависимости dE/dx от R , ограничивающие область наиболее вероятного нахождения изотопов в диапазоне жесткостей от 0.5 до 100 ГВ. Для построения ограничивающих линий использовались данные моделирования в Geant4 процесса прохождения ядер ${}^6\text{Li}$, ${}^7\text{Li}$ через спектрометр РАМЕЛА. При фиксированных R были установлены квантили распределения по dE/dx , исключаящие 2% событий сверху и 1% снизу. По полученным точкам проводилось фитирование методом наименьших квадратов по параметрическому уравнению:

Таблица 1. Доли событий вне области ядер лития (фона) на зависимости ионизационных потерь в первой плоскости калориметра от жесткости в 4 диапазонах жесткостей

R, ГВ	Доля фона			
	0.5–2	2–5	5–10	10–100
Моделирование	8.7% ± 0.1%	5.0% ± 0.1%	4.8% ± 0.1%	4.0% ± 0.1%
Эксперимент	7.3% ± 0.5%	5.5% ± 0.3%	6.1% ± 0.4%	5.0% ± 0.7%

$$\frac{dE}{dx} = \begin{cases} A_1 \left(1 + \frac{A_3}{R^2}\right) \left[\ln \left(\frac{A_2 R}{A_3 + R^2} \right) - \frac{R^2}{A_3 + R^2} + A_4 \right] + A_5, & R > 2 \text{ ГВ} \\ A_1 \left(1 + \frac{A_3}{R^2}\right) \left[\frac{R^2}{A_4 + R^2} \right], & R \leq 2 \text{ ГВ} \end{cases},$$

где R – жесткость частицы, A_i – параметры фитирования, а уравнение представляет собой параметризованную формулу Бете–Блоха, преобразованную к виду $dE/dx(R)$. Полученные кривые приведены на рис. 1 вместе с данными моделирования близких по заряду к литию ядер КЛ.

Используя измеренные во времяпролетной системе [9] значения ионизационных потерь dE/dx и скорости частицы β , составлены и применены аналогичные описанным выше критерии с использованием зависимостей dE/dx в трекаре и dE/dx во времяпролетной системе, но от скорости β .

Для оценки эффективности отбора полезных событий и качества режекции фона использована зависимость ионизационных потерь dE/dx в первой плоскости калориметра [10] от жесткости частицы R . Частицы попадают в калориметр после прохождения трековой и времяпролетной систем, что позволяет применить его для оценки качества критериев. На этой зависимости построены ограничивающие линии и произведена оценка доли фона, образуемого в результате взаимодействия ядер лития с веществом прибора, т.е. событий, находящихся на этой зависимости вне области ядер лития. Доли фона должны совпадать для данных моделирования и эксперимента. Их избыток в эксперименте предполагал бы низкое качество режекции других частиц, недостаток же – низкую эффективность отбора полезных событий. Вычисленные значения долей фона в 4-х диапазонах жесткостей представлены в табл. 1. Полученные для экспериментальных данных близки к определенным по моделированию (5–8%), что дает возможность утверждать о достаточности составленных критериев отбора.

Для выделения галактической компоненты КЛ, рассматривались события, зарегистрированные только в областях, где номер магнитной оболочки > 5 в геомагнитных координатах Мак-Илвейна. Это область выделена на основе анализа зависимости темпа счета ядер лития от L при низких жесткостях частиц (0.5–2 ГВ).

РЕЗУЛЬТАТЫ

На основании построенных критериев отбора для ядер лития, была произведена обработка данных эксперимента PAMELA, полученных за 8 лет работы прибора (с 06.2006 по 09.2014), восстановлено время наблюдения (экспозиция) в области $L > 5$, а также вычислены значения эффективности детекторов и светосилы отбора событий.

В результате восстановлены дифференциальные энергетические спектры ядер лития ГКЛ в диапазоне жесткостей от 0.5 до 100 ГВ с интервалом усреднения в один год, что позволяет оценить эффекты солнечной модуляции в рамках 11-летнего цикла солнечной активности. На рис. 2а–2г представлены вариации потоков ядер лития ГКЛ в 6 выделенных диапазонах жесткостей (результат предварительный). Для сравнения приведены данные о среднемесячном количестве солнечных пятен [11], выбранных в качестве характеристики солнечной активности (рис. 2д). В период с 2006 до 2009 г. наблюдается рост интенсивности ядер лития, что соответствует периоду спада солнечной активности. Далее, с 2010 по 2014 г. наблюдается уменьшение потока, что совпадает с периодом роста солнеч-

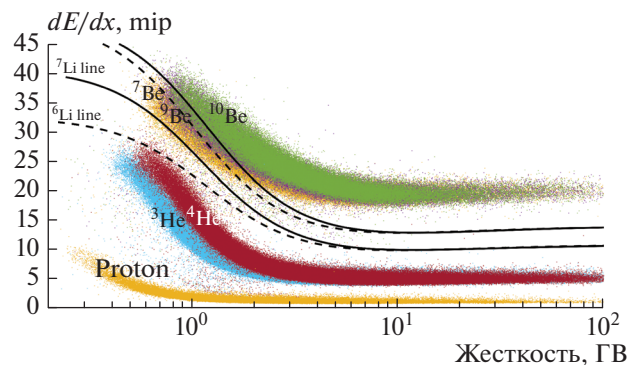


Рис. 1. Ограничивающие линии (${}^6\text{Li}$ line, ${}^7\text{Li}$ line) на зависимости ионизационных потерь dE/dx от жесткости для изотопов ${}^6\text{Li}$, ${}^7\text{Li}$. Также на графике приведены данные моделирования близких по заряду изотопов, которые могут являться источником фона при отборе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе восстановлены временные вариации дифференциальных энергетических спектров ядер лития ГКЛ по данным эксперимента PAMELA в диапазоне жесткостей от 0.5 до 100 ГВ на 8-летнем интервале с 06.2006 по 09.2014. Для этого построены критерии отбора ядер лития ГКЛ, проведена оценка их качества и вычислена светосила прибора. Наблюдается связь вариаций потоков с цикличностью солнечной активности. Полученные данные являются новыми и могут быть востребованы в изучении механизмов переноса КЛ через гелиосферу. В дальнейшем планируется провести подробный анализ полученных результатов.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект “Фундаментальные проблемы космических лучей и темная материя” № 0723-2020-0040) и при поддержке Российского научного фонда (проект № 20-72-10170).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Potgieter M.S.* // Living Rev. Sol. Phys. 2013. V. 10. Art. No. 3.
2. *Майоров А.Г., Адриани О., Базилевская Г.А. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2011. Т. 75. № 6. С. 828; *Maierov A.G., Adriani O., Barbarino G. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2011. V. 75. No. 6. P. 779.
3. *Adriani O., Barbarino G.C., Bazilevskaya G.A. et al.* // Astrophys. J. 2013. V. 765. No. 2. Art. No. 91.
4. *Martucci M., Munini R., Boezio M. et al.* // Astrophys. J. Lett. 2018. V. 854. No. 1. Art. No. L2.
5. *Marcelli N., Boezio M., Lenni A. et al.* // Astrophys. J. 2020. V. 893. No. 2. Art. No. 145.
6. *Picozza P., Galper A.M., Castellini G. et al.* // Astropart. Phys. 2007. V. 27. No. 4. P. 296.
7. *Adriani O., Barbarino G.C., Bazilevskaya G.A. et al.* // Riv. Nuovo. Cim. 2017. V. 40. No. 10. P. 473.
8. *Adriani O., Bonechi L., Bongi M. et al.* // Nucl. Instrum. Meth. A. 2003. V. 511. P. 72.
9. *Barbarino G., Boscherini M., Campana D. et al.* // Nucl. Phys. B. Proc. Suppl. 2003. V. 125. P. 298.
10. *Boezio M., Bonvicini V., Mocchiutti E. et al.* // Nucl. Instrum. Meth. A. 2002. V. 487. No. 3. P. 407
11. http://www.sidc.be/silso/DATA/SN_m_tot_V2.0.txt.

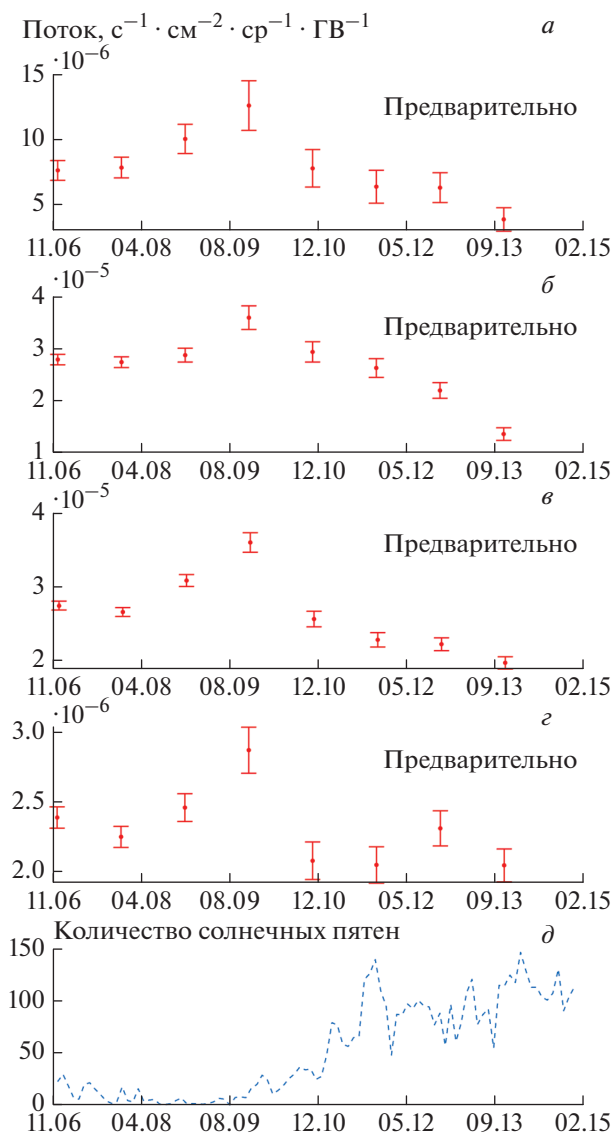


Рис. 2. Вариации потоков ядер лития ГКЛ с 2006 по 2014 гг. в 4 выделенных диапазонах жесткостей: 0.5–1 ГВ (а), 1–2 ГВ (б), 2–5 ГВ (в), 5–20 ГВ (г). Для сравнения приведены данные о среднемесечном количестве солнечных пятен (д).

ной активности. При этом амплитуда вариаций уменьшается с увеличением энергии частиц.

Variations of the Galactic lithium flux from 2006 to 2014 measured in the PAMELA experiment

A. A. Epifanov^{a,*}, A. G. Mayorov^a

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

*e-mail: aepifanov.inbox@gmail.com

We present preliminary measurement results of long-term variations of the galactic lithium spectra in the rigidity range from 0.5 to 100 GV during the period from 2006 to 2014 with annual averaging based on the PAMELA experiment data. In order to achieve this, we constructed selection criteria for lithium nuclei, estimated their efficiency and determined acceptance of the instrument. The behavior of the obtained spectra is consistent with changes in solar activity in the considered time interval.