

УДК 524.1

АМПЛИТУДНЫЕ И ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ 27-ДНЕВНЫХ ВАРИАЦИЙ ПОТОКА ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ, ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫХ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ PAMELA С 2006 ПО 2016 ГОД

© 2021 г. Р. Ф. Юлбарисов¹*, Н. Г. Галикян¹, А. Г. Майоров¹, О. А. Голуб¹,
В. В. Малахов¹, С. А. Роденко¹

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

*E-mail: rfyulbarisov@mephi.ru

Поступила в редакцию 21.06.2021 г.

После доработки 05.07.2021 г.

Принята к публикации 28.07.2021 г.

С июня 2006 г. по январь 2016 г. спектрометры PAMELA и ARINA зарегистрировали несколько случаев возникновения 27-дневных вариаций потока галактических космических лучей (ГКЛ). Восстановлены характеристики ГКЛ: представлена временная динамика амплитуды вариаций для различных энергий и получены амплитудно-энергетические зависимости для нескольких эпизодов возникновения вариаций.

DOI: 10.31857/S0367676521110387

ВВЕДЕНИЕ

С конца 30-х годов XX в. во временном профиле потока галактических космических лучей (ГКЛ) наблюдаются вариации с периодом около 27 сут [1]. Обнаруженные С. Форбушем по измерениям сети ионизационных камер [2], эти вариации впоследствии были зарегистрированы в прямых измерениях потока галактических частиц в космосе [3].

Несмотря на длительную историю наблюдений этого явления, механизм 27-дневной модуляции ГКЛ остается не совсем ясным из-за множества вовлеченных в него процессов. Современный анализ показал связь вариаций потока галактических частиц с характеристиками межпланетной среды, такими как скорость солнечного ветра и напряженность магнитного поля. Характерные особенности, возникающие во временных рядах параметров гелиосферы и потока космических лучей, хорошо соотносятся друг с другом. Однако ни один физический параметр не был признан единственным или основным для возникновения модуляции ГКЛ [4], а существующие теоретические модели недостаточно хорошо воспроизводят характеристики 27-дневных вариаций потока частиц [5, 6].

Современные исследования 27-дневных вариаций потока ГКЛ проводятся по данным мониторинговых космических аппаратов (ACE, STEREO, SOHO) и наземной сети нейтронных

мониторов. Однако в первом случае наблюдению доступны только космические лучи низких энергий, а во втором — высоких (больше нескольких ГэВ).

Измерения потока галактических частиц в эксперименте PAMELA покрывают широкий энергетический диапазон и заполняют интервал, в котором отсутствуют данные других экспериментов. В области низких энергий их дополняют наблюдения, выполненные в эксперименте ARINA.

ЭКСПЕРИМЕНТЫ PAMELA И ARINA

Магнитный спектрометр PAMELA [7] и сцинтилляционный спектрометр ARINA [8] расположены на борту космического аппарата Ресурс-ДК1.

В состав научной аппаратуры PAMELA входит набор детекторных систем, позволяющих надежно идентифицировать тип частицы, определять величину и знак заряда, а также с высокой точностью измерять ее скорость, энергию и магнитную жесткость.

Спектрометр ARINA представляет собой малогабаритный многослойный сцинтилляционный детектор, в котором регистрируются остановившиеся в нем частицы — электроны с энергиями 3–30 МэВ и протоны с энергиями 30–100 МэВ. Электронно-протонное разделение осуществля-

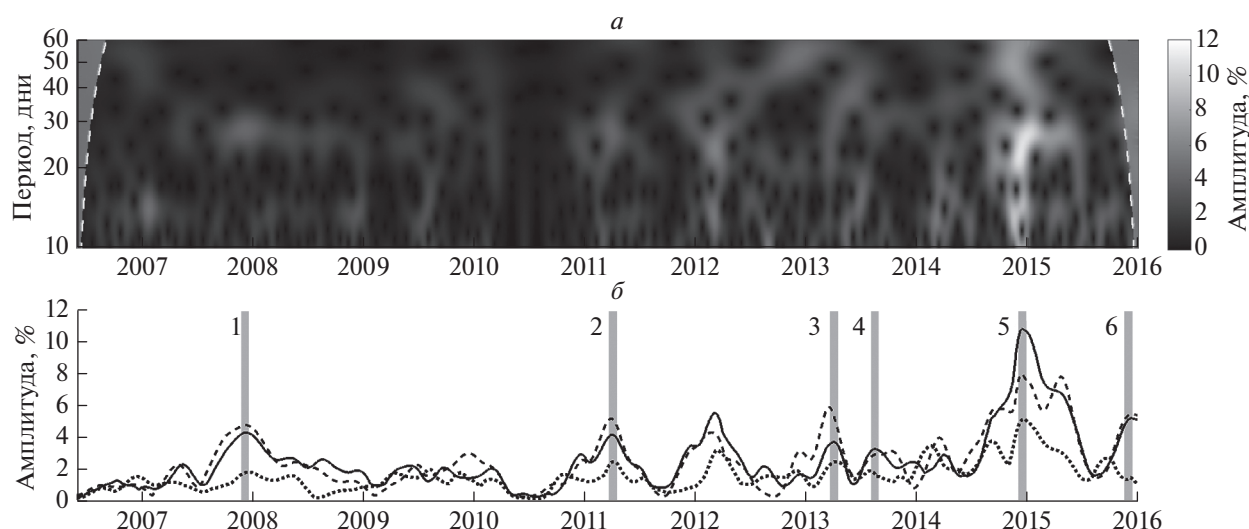


Рис. 1. Амплитудная скалограмма для временного ряда потока протонов с жесткостью 1.0–1.2 ГВ (а). Временная динамика амплитуды 27-дневных вариаций потока протонов с жесткостью 1.0–1.2 ГВ (сплошная линия), 0.6–0.7 ГВ (штриховая линия) и 4.2–5.4 ГВ (пунктирная линия). Серыми полосами обозначены и пронумерованы рассмотренные в работе эпизоды возникновения 27-дневных вариаций (б).

ется по энерговыделению в детекторах, энергия частиц определяется по их пробегу.

Измерения потока космических лучей на околоземной орбите проводились с июня 2006 г. по январь 2016 г. В экспериментах получены суточные дифференциальные энергетические спектры частиц различного типа в диапазоне энергий от нескольких десятков МэВ до сотен ГэВ. Такой временной шаг позволяет изучать кратковременные вариации их потоков.

ОБРАБОТКА ДАННЫХ

В работе использованы временные ряды потока протонов и ядер гелия с жесткостью от 0.45 ГВ до ~10 ГВ. Точность измерений позволяет разбить этот интервал на несколько диапазонов и исследовать энергетическую зависимость вариаций.

Для определения амплитуды вариаций с периодом ~27 сут из временных рядов вычитается тренд долговременной модуляции потока ГКЛ, вызванной 11-летним циклом изменения уровня солнечной активности. В результате получаются нормированные потоки, показывающие отклонение от среднего значения в процентах.

Определение амплитуды вариаций проводилось с помощью непрерывного вейвлет-преобразования [9]. Этот метод хорошо подходит для анализа нестационарных временных рядов. В отличие от преобразования Фурье он позволяет выделять из сигнала 27-дневные гармоники в различные моменты времени.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результат вейвлет-преобразования временного ряда потока протонов в период с 2006 по 2016 г. с жесткостью 1.0–1.2 ГВ приведен на рис. 1а. Амплитудная скалограмма показывает исходный сигнал в частотно-временном представлении. По горизонтальной оси отложено время, по вертикальной — период в днях, оттенками серого показана амплитуда вариаций в процентах.

При выделении амплитуд, соответствующих периоду ~27 сут, в явном виде получается временная динамика 27-дневных вариаций. На рис. 1б представлены временные зависимости амплитуды для трех значений жесткости; пики на графике соответствуют различным эпизодам возникновения вариаций.

Рассмотрены несколько случаев, отмеченных серыми полосами на рис. 1б. Описанная методика применена ко всем временным рядам потока протонов и ядер гелия, полученным в экспериментах PAMELA и ARINA, после чего построены энергетические распределения амплитуд 27-дневных вариаций космических лучей.

Сравнение таких зависимостей (рис. 2) показывает повышенное значение амплитуды в 2014 г., что связано с увеличением уровня солнечной активности, взаимосвязь с которой известна давно [10]. Форма амплитудных спектров во всех случаях схожа. Часть спектров, соответствующая высоким жесткостям (>1 ГВ), может быть аппроксимирована степенным законом. Такое описание встречается в исследованиях 27-дневных вариаций по данным нейтронных мониторов [11, 12]. В

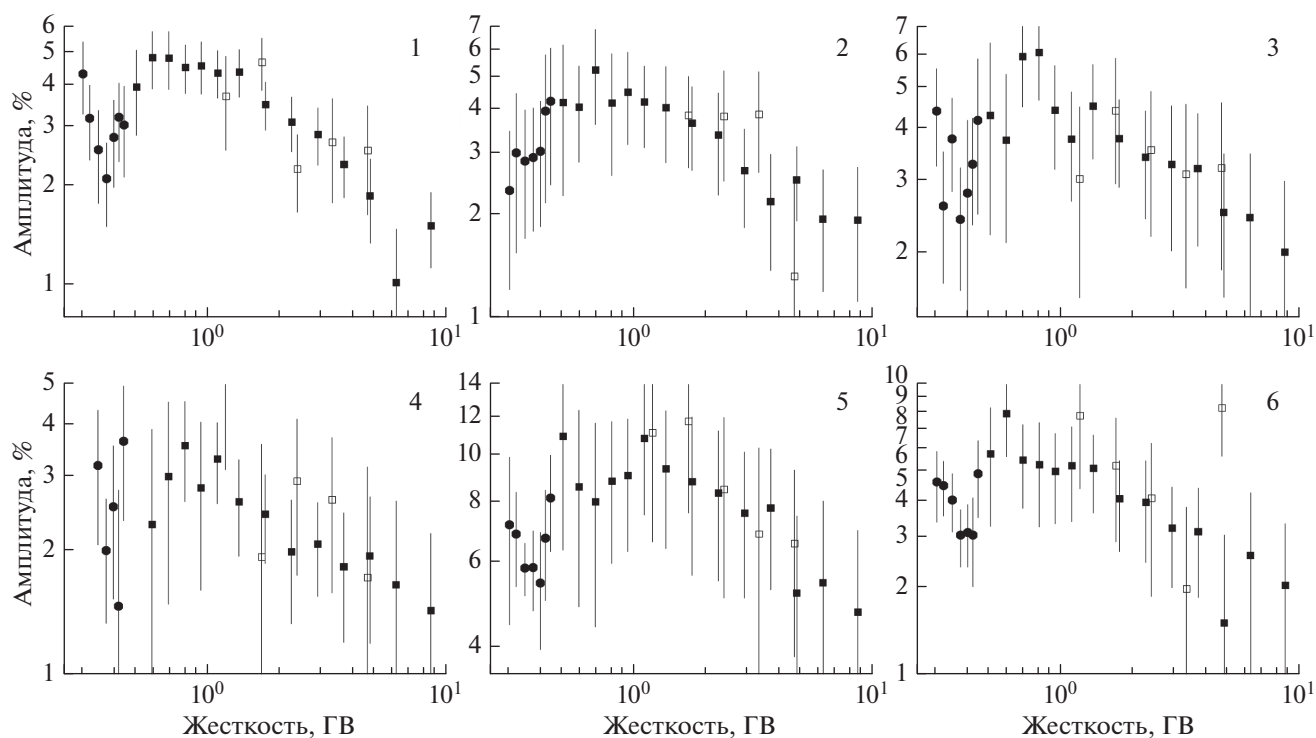


Рис. 2. Энергетические зависимости амплитуд 27-дневных вариаций потока протонов (черные квадраты) и ядер гелия (белые квадраты) по данным PAMELA и потока протонов (черные кружки) по данным ARINA. В углу отмечен порядковый номер рассмотренного в работе эпизода возникновения 27-дневных вариаций.

левой части спектров наблюдается отклонение от этого закона: в области средних жесткостей (0.6–1 ГВ) спектры выходят на плато, при низких жесткостях (<0.6 ГВ) амплитуды вариаций начинают уменьшаться и достигают минимума.

Представленные спектры получены впервые для нескольких случаев возникновения 27-дневных вариаций, зарегистрированных в рамках одного эксперимента в околоземном пространстве. Ранее подобная амплитудно-энергетическая зависимость наблюдалась космическим аппаратом Улисс [13], однако его измерения проводились в других условиях и на высоких гелиоширотах. Также недавно был опубликован результат анализа 27-дневных вариаций по данным эксперимента PAMELA для одного известного случая, наблюдавшегося в 2007–2008 г. [14], в котором обсуждаются описанные выше особенности амплитудного спектра.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты интересны в контексте изучения природы 27-дневных вариаций и их теоретического описания. В последние годы по данной тематике ведутся работы, в которых с помощью МГД моделирования определяются характеристики межпланетной среды и численно

решается уравнение переноса космических лучей [15]. Также возможен подход, заключающийся в прямом вычислении траектории движения галактических частиц и многократной симуляции их прохождения через гелиосферу. Оба подхода в результате должны воспроизвести представленные в работе временные зависимости и амплитудные спектры, позволив определить механизм кратковременной модуляции потока ГКЛ.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект “Фундаментальные проблемы космических лучей и темная материя” № 0723-2020-0040) и Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-02-00582).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Forbush S.E.* // *Terr. Magn. Atmos. Electr.* 1938. V. 43. No. 3. P. 135.
2. *Compton A.H., Wollan E.O., Bennett R.D.* // *Rev. Sci. Instrum.* 1934. V. 5. No. 12. P. 415.
3. *Bryant D.A., Cline T.L., Desai U.D. et al.* // *Phys. Rev. Lett.* 1963. V. 11. No. 4. P. 144.
4. *Kumar A., Badruddin B.* // *Sol. Phys.* 2014. V. 289. No. 11. P. 4267.
5. *Guo X., Florinski V.* // *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2014. V. 119. No. 4. P. 2411.
6. *Guo X., Florinski V.* // *Astrophys. J.* 2016. V. 826. P. 65.

7. *Picozza P., Galper A.M., Castellini G. et al.* // *Astropart. Phys.* 2007. V. 27. No. 4. P. 296.
8. *Бакалдин А.В., Батищев А.Г., Воронов С.А. и др.* // *Космич. исслед.* 2007. Т. 45. № 5. С. 471; *Bakaldin A.V., Batishchev A.G., Voronov S.A. et al.* // *Cosmic Res.* 2007. V. 45. No. 5. P. 445.
9. *Добеши И.* Десять лекций по вейвлетам. Ижевск: НИЦ Регулярная и хаотическая динамика, 2001. 464 с.
10. *Balasubrahmanyam V.K., Venkatesan D.* // *Sol. Phys.* 1970. V. 11. No. 1. P. 151.
11. *Gil A., Alania M.V.* // *Sol. Phys.* 2013. V. 283. No. 2. P. 565.
12. *Gil A., Alania M.V.* // *Sol. Phys.* 2016. V. 291. No. 6. P. 1877.
13. *McKibben R.B., Simpson J.A., Zhang M. et al.* // *Space Sci. Rev.* 1995. V. 72. P. 403.
14. *Modzelevska R., Bazilevskaya G.A., Boezio M. et al.* // *Astrophys. J.* 2020. V. 904. P. 3.
15. *Luo X., Zhang M., Feng X. et al.* // *Astrophys. J.* 2020. V. 899. No. 2. P. 90.

Amplitude and temporal characteristics of the 27-day variations of the galactic cosmic rays' flux measured with the PAMELA experiment between 2006 and 2016

R. F. Yulbarisov^{a,*}, N. G. Galikyan^a, A. G. Mayorov^a, O. A. Golub^a, V. V. Malakhov^a, S. A. Rodenko^a

^a*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia*

^{*}*e-mail: rfyulbarisov@mephi.ru*

From June 2006 to January 2016, the PAMELA and ARINA spectrometers recorded several cases of the 27-day variations in the flux of galactic cosmic rays. The paper deals with the reconstruction of their characteristics: the temporal dynamics of the amplitude of variations for different energies is presented, and amplitude-energy dependencies for several episodes of the occurrence of variations are obtained.