

УДК 524.1

ИЗУЧЕНИЕ 27-ДНЕВНЫХ ВАРИАЦИЙ ПОТОКА ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ПО ДАННЫМ ЭКСПЕРИМЕНТА ПАМЕЛА

© 2019 г. И. К. Троицкая¹, А. Г. Майоров¹, В. В. Малахов¹, Р. Модзелевска²,
С. А. Роденко¹, * от имени коллаборации ПАМЕЛА

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

²Университет естественных и гуманитарных наук, Седльце, Польша

*E-mail: SARodenko@mephi.ru

Поступила в редакцию 15.09.2018 г.

После доработки 06.11.2018 г.

Принята к публикации 28.01.2019 г.

Спектрометры ПАМЕЛА и АРИНА на борту КА Ресурс-ДК1 с июня 2006 г. до января 2016 г. проводили прецизионные измерения потока космических лучей в широком диапазоне энергий, включая интервал от 30 МэВ до десятков ГэВ. Благодаря этому возможно получить новую информацию о характеристиках вариаций потока галактических космических лучей, включая период, амплитуду и их зависимость от энергии частиц. В работе приводятся первые предварительные результаты по данному исследованию, полученные при помощи вейвлет-анализа временных рядов потоков протонов и ядер гелия.

DOI: 10.1134/S0367676519050387

ВВЕДЕНИЕ

Впервые временные вариации потоков галактических космических лучей (ГКЛ) с периодом около 27 дней были обнаружены С. Форбушем на основании измерений всемирной сети ионизационных камер, созданной в конце 1930-х гг. (прототипа современной сети нейтронных мониторов) [1, 2]. Позднее в 1960-х были проведены первые измерения потоков ГКЛ в космическом пространстве, подтвердившие этот результат [3]. Последующий анализ показал связь 27-дневных вариаций потока галактических частиц с характеристиками межпланетной среды, например, со скоростью солнечного ветра или напряженностью межпланетного магнитного поля, которые, в свою очередь, связаны с вращением Солнца вокруг своей оси, имеющим сходный период. Однако полного физического описания эффекта на текущий момент нет из-за ограничений статистики и точности имеющихся наблюдений.

Природа возникновения 27-дневных вариаций сегодня изучается как с помощью космических аппаратов, так и с помощью нейтронных мониторов (НМ), однако полученные данные находятся либо в диапазоне слишком низких энергий (космические эксперименты Stereo, ACE), либо очень высоких (НМ чувствительны только к энергиям выше нескольких ГэВ из-за поглощения частиц в ат-

мосфере и геомагнитного обрезания космических лучей).

Сегодня в исследовании проблемы 27-дневных вариаций ГКЛ сделан следующий шаг. С июня 2006 г. до января 2016 г. (в течение практически полного цикла солнечной активности) на российском космическом аппарате Ресурс-ДК1 проводились известные эксперименты ПАМЕЛА и АРИНА.

1. ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПАМЕЛА И АРИНА

В состав магнитного спектрометра ПАМЕЛА входят несколько детекторных систем, позволяющих измерять скорость частиц, заряд и знак, жесткость (отношение импульс/заряд) и энергию. Подробности проведения эксперимента и описание научной аппаратуры можно найти в работе [4].

Сцинтилляционный спектрометр АРИНА регистрирует протоны и электроны низких энергий и измеряет их энергию. Его устройство подробно описано в работе [5].

Спектрометры ПАМЕЛА и АРИНА покрывают недостающий и наиболее интересный для изучения интервал промежуточных энергий от 30 МэВ до десятка ГэВ. Благодаря такому диапазону энергий можно получить новую информа-

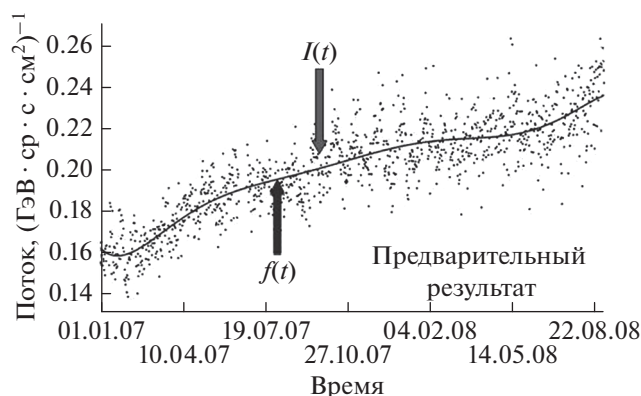


Рис. 1. Наложение графика фитирующей функции $f(t)$ на экспериментальные данные $I(t)$, полученные в эксперименте ПАМЕЛА с 1 января 2007 г. до 31 августа 2008 г.

ция о характеристиках вариаций интенсивности ГКЛ.

2. ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

В эксперименте ПАМЕЛА выделялись протоны и ядра гелия по средним ионизационным потерям частиц в магнитной трековой системе в зависимости от измеренной жесткости. Отобраны события с жесткостью, превышающей пороговую жесткость геомагнитного обрезания в 1.1 раза.

В эксперименте АРИНА выделялись протоны по энерговыделению вдоль трека в стопке сцинтилляционных детекторов, энергия частиц определялась по длине пробега.

Эффективность регистрации и геометрический фактор приборов были вычислены методом Монте-Карло при помощи пакета программ на основе GEANT4 [6], а также оценены из самих экспериментальных данных.

Экспозиция определена, исходя из известного местоположения спутника и измерения мертвого времени для каждого зарегистрированного события.

В результате обработки данных спектрометров ПАМЕЛА и АРИНА в течение всего времени работы приборов на КА Ресурс-ДК-1 (с июня 2006 по январь 2016 гг.) получены ежедневные данные об интенсивности протонов и ядер гелия ГКЛ для различных диапазонов энергий.

3. АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Для изучения колебаний с периодом ~ 27 дней было исключено влияние долговременной модуляции ГКЛ, для чего проведено преобразование:

$$J(j) = \frac{I(t)}{f(t)} - 1,$$

где $I(t)$ — временной ряд экспериментальных данных, полученных за каждые 12 ч, $f(t)$ — фитирующая функция, описывающая долговременную модуляцию потока протонов ГКЛ, t — время. Полученная безразмерная величина $J(t)$ имеет среднее значение ноль и может использоваться для выделения короткопериодических вариаций (рис. 1) с помощью различных вариантов гармонического анализа.

Наиболее современный метод, подходящий для анализа нестационарных сигналов с широким спектром частот, — это непрерывное вейвлет-преобразование, которое не обладает некоторыми недостатками преобразования Фурье, характерными для такого случая [7, 8]. Метод вейвлет-анализа обеспечивает двумерное представление исследуемого сигнала в частотной области в плоскости частота—время. Нормированные данные представляются как нестационарный сигнал с широким спектром частот. В работе использован алгоритм непрерывного вейвлет-преобразования SWT, реализованный в пакете прикладных программ MATLAB [9].

4. РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 2 представлена амплитудная скалограмма для всего периода работы спектрометра ПАМЕЛА, полученная для временного ряда интенсивности протонов с жесткостью от 0.7 до 0.8 ГВ.

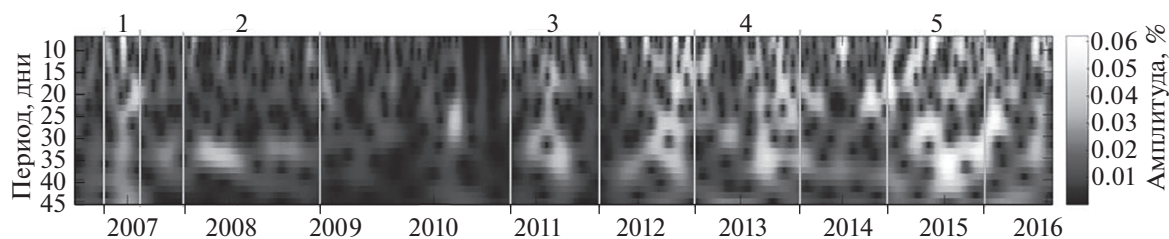


Рис. 2. Магнитудная скалограмма для временного ряда интенсивности протонов с жесткостью от 0.7 до 0.8 ГВ (по данным эксперимента ПАМЕЛА).

Таблица. Амплитуды колебаний

Дата	Максимальная амплитуда (протоны), %	Максимальная амплитуда (ядра гелия), %
14.10.2006–02.02.2007	~3.1	~3.8
23.08.2007–10.03.2008	~4.1	~3.7
16.10.2010–03.06.2011	~4.0	~3.3
28.02.2012–03.04.2013	~5.6	~5.5
05.09.2014–19.02.2015	~7.7	~7.9

Она представляет собой разложение временного ряда по частотам для каждого момента времени. По горизонтальной оси отложено время, по вертикальной слева – периоды (величина обратная частоте) в днях (от 20 до 45 дней), шкала справа оттенков серого цвета, показывает мощность частоты в данный момент времени в единицах амплитуды (%). За время проведения экспериментов ПАМЕЛА и АРИНА было зарегистрировано несколько случаев возникновения периодических вариаций ГКЛ с амплитудой ~27 дней.

Яркие области, соответствующие выраженным колебаниям с периодом ~27 дней, наблюдались 5 раз и на рис. 2 отмечены цифрами.

Наиболее интересные для описания и интенсивные случаи наблюдались дважды. Первый – в период 2007–2009 гг. в условиях практически плоского гелиосферного токового слоя, второй – в период 2014–2015 гг., уже в условиях высокой солнечной активности. В экспериментах ПАМЕЛА и АРИНА зарегистрированы и хорошо видны оба этих случая.

Для выбранного диапазона частот, соответствующего периоду ~27 дней, применен метод доминирующих амплитуд, позволивший определить максимальную амплитуду колебаний потока протонов во времени в указанном временном диапазоне. В таблице дана предварительная информация об амплитуде колебаний для каждого из этих периодов.

Работа по исследованию 27-дневных вариаций ГКЛ при помощи экспериментальных данных спектрометров ПАМЕЛА и АРИНА продолжается, проводится исследование энергетической зависимости периода и амплитуды вариаций.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 18-02-00582). Р.М. выражает благодарность Польскому Национальному Научному Центру, номер гранта 2017/01/X/ST9/01023.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Forbush S.E.* // Terr. Mag. 1938. V. 43. P. 135.
2. *Compton A.H., Wollan E.O., Bennett R.D.* // Rev. Sci. Instr. 1934. V. 5. P. 415.
3. *Bryant D.A., Cline T.L., Desai U.D. et al.* // Phys. Rev. Lett. 1963. V. 11. № 4. P. 144.
4. *Picozza P., Galper A.M., Castellini G. et al.* // Astropart. Phys. 2007. V. 27. № 4. P. 296.
5. *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. № 5. P. 445.
6. <https://geant4.web.cern.ch/>.
7. *Малла С.А.* Вейвлеты в обработке сигналов. М.: Мир, 2005. 671 с.
8. *Добеши И.* Десять лекций по вейвлетам. Ижевск: НИЦ Регулярная и хаотическая динамика. 2001. 464 с.
9. <https://www.mathworks.com/>.