

УДК 524.1

## ФОРБУШ-ПОНИЖЕНИЯ В ПОТОКАХ ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ПО ДАННЫМ ЭКСПЕРИМЕНТА ПАМЕЛА

© 2019 г. И. А. Лагойда<sup>1</sup>, \*, С. А. Воронов<sup>1</sup>, В. В. Михайлов<sup>1</sup>

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

\*E-mail: [iliyalagoida@gmail.com](mailto:iliyalagoida@gmail.com)

Поступила в редакцию 10.10.2018 г.

После доработки 20.02.2019 г.

Принята к публикации 26.04.2019 г.

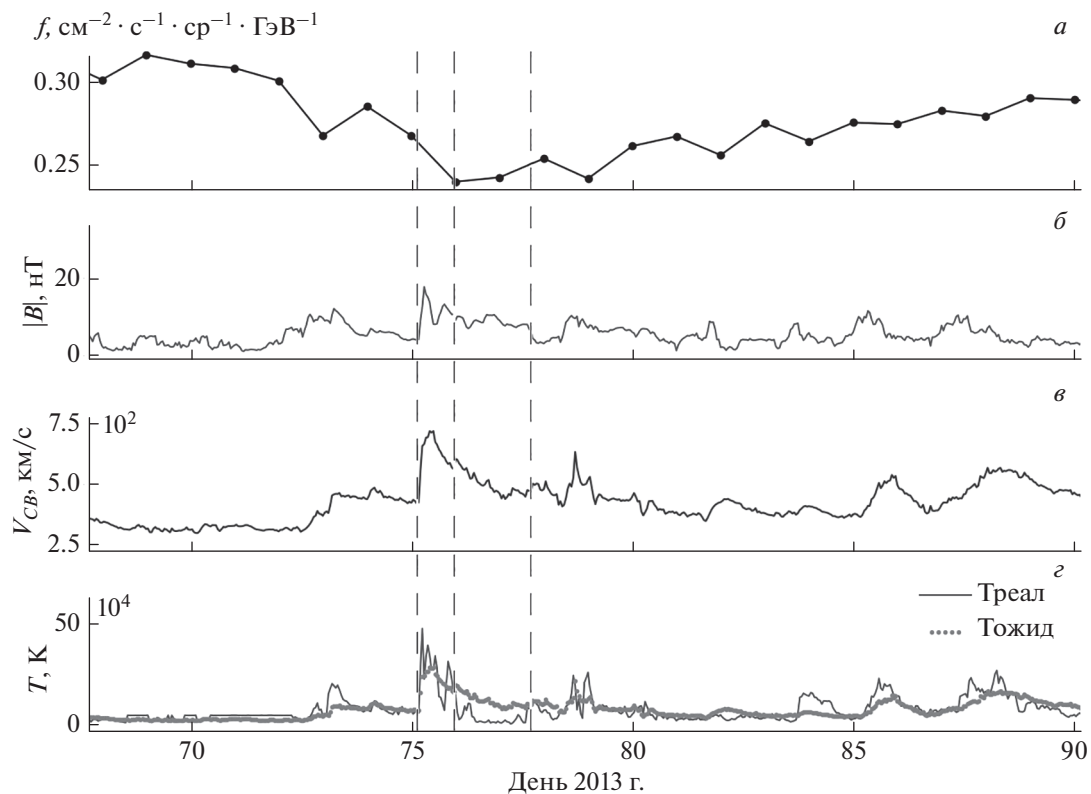
Представлен анализ амплитуд форбуш-понижений, зарегистрированных в эксперименте ПАМЕЛА в период с 2006 по 2014 гг., в зависимости от характеристик межпланетного пространства, таких как величина модуля магнитного поля, скорость солнечного ветра и температура плазмы. Телескоп ПАМЕЛА, состоящий из времяпролетной системы, магнитного спектрометра, систем анти-совпадений, электромагнитного калориметра и нейтронного детектора, был запущен на орбиту Земли на борту спутника “Ресурс ДК1” в июне 2006 г. и продолжал работать в течение 10 лет.

DOI: 10.1134/S0367676519080258

### ВВЕДЕНИЕ

Форбуш-понижения представляют собой кратковременные уменьшения регистрируемой интенсивности космических лучей. К основным причинам таких понижений относятся корональные выбросы масс (КВМ) с поверхности Солнца, часто сопровождающиеся солнечными вспышками [1]. КВМ распространяются в гелиосфере в широком интервале скоростей, от  $200 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$  до  $3000 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$ . Наиболее мощные КВМ обычно возникают при перезамыкании магнитных силовых линий на Солнце, когда сложные конфигурации магнитных полей в нижней части короны становятся слишком неустойчивыми и перестраиваются в более равновесную конфигурацию [2]. Такие КВМ могут достигать окрестности Земли в течение 15–18 ч, в то время как более медленные КВМ проходят то же расстояние в течение нескольких дней. По мере распространения в межпланетной среде корональные выбросы масс расширяются в размерах и искажают характеристики межпланетного пространства, такие как магнитное поле, скорость солнечного ветра и температура плазмы, что в свою очередь проявляется в уменьшении интенсивности космического излучения, регистрируемого в межпланетном и околоземном пространстве. Большинство массивных КВМ по мере распространения в космической среде способны создать ударную волну, после прохождения которой пространство заполняется облаком плазмы, называемым выбросом – более медленной компонентой КВМ, следующей за ударной волной. На сегодняшний день эти две компоненты КВМ возможно различить.

Так, ударная волна проявляется в резком увеличении межпланетного магнитного поля, скорости солнечного ветра и температуры плазмы, а выброс может проявляться в заниженных значениях температуры ( $T_{\text{реал}}$ ) плазмы солнечного ветра относительно ожидаемых значений ( $T_{\text{ожд}}$ ), вычисленных из корреляции между скоростью солнечного ветра и температурой [3]. Области, для которых  $T_{\text{реал}}/T_{\text{ожд}} \leq 0.5$ , являются косвенным признаком прохождения выброса. На рис. 1 представлено форбуш-понижение в потоке протонов в диапазоне энергий 0.7–1.5 ГэВ, зарегистрированное спектрометром ПАМЕЛА в марте 2013 г. Первая стадия уменьшения потока космических лучей относительно прежнего невозмущенного уровня ( $f \sim 0.3 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1} \cdot \text{ГэВ}^{-1}$ ) связана с КВМ, произошедшим 12 марта. Как видно из рисунка, эффект понижения сопровождается постепенным увеличением скорости солнечного ветра и межпланетного магнитного поля и начинает фазу восстановления уже на следующий день. Все это говорит о том, что наблюдаемое КВМ не было достаточно мощным для создания ударной волны и состояло только из второй компоненты КВМ – выброса солнечной плазмы. КВМ, произошедшее 15 марта, спровоцировало ударную волну в межпланетном пространстве, проявившуюся в резком увеличении значений исследуемых межпланетных величин, а также в значительно более продолжительном понижении потока космических протонов. Следовательно, более сложные КВМ, состоящие из ударной волны и из выброса солнечной плазмы, оказывают более продолжительный модулирующий эффект на интенсив-



**Рис. 1.** Форбуш-эффект в марте 2013 г. по данным спектрометра ПАМЕЛА. *a* – Поток космических протонов,  $E = 0.7–1.5$  ГэВ; *б* – модуль межпланетного магнитного поля, *в* – скорость солнечного ветра, *г* – температура плазмы солнечного ветра.

ность космического излучения. Согласно вышеперечисленным критериям, на рисунке пунктирными линиями отмечены области прохождения ударной волны и выброса для КВМ, произошедшего 15 марта.

### 1. ЭКСПЕРИМЕНТ

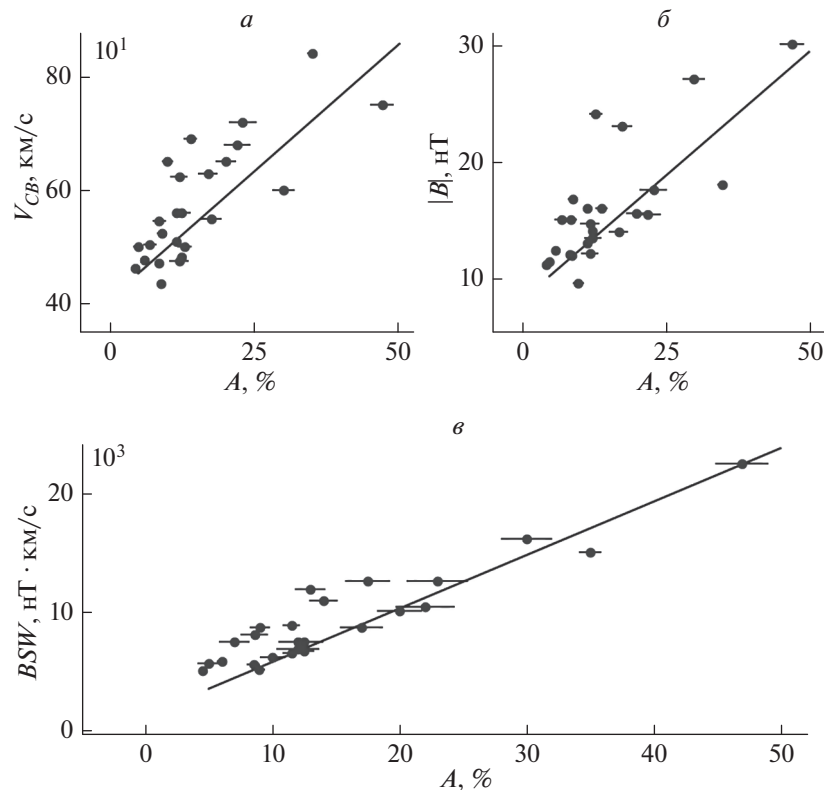
Эксперимент ПАМЕЛА проводился на борту спутника “Ресурс ДК1”, запуск которого состоялся 15 июня 2006 г. Спутник был запущен на эллиптическую орбиту (высота 350–600 км, наклонение 70.4°). Прибор ПАМЕЛА состоит из магнитного спектрометра на основе постоянного магнита ~0.4 Т, окруженного детекторами антисовпадений, позиционно-чувствительного калориметра, времяпролетной системы, а также нейтронного детектора. Спектрометр имеет 6 стриповых кремниевых плоскостей, которые измеряют координаты трека с точностью до 3 мкм, что позволяет определить знак заряда частиц и их жесткость по отклонению в магнитном поле. Позиционно-чувствительный калориметр состоит из 44 однослойных стриповых кремниевых детекторов, прослоенных вольфрамовыми пластинами толщиной 0.26 см каждая. Суммарная толщина поглотителя соответствует  $16.3 X_0$  (радиационной длины). Электромагнитный калориметр позволя-

ет проводить разделение электромагнитных и адронных каскадов и измерять энергию электронов и позитронов. Геометрический фактор прибора составляет  $21.6 \text{ см}^2 \cdot \text{ср}$ . [4].

### 2. АНАЛИЗ ДАННЫХ

В данной работе для изучения характеристик форбуш-понижений и поиска основного параметра, модулирующего амплитуды исследуемого эффекта, использовались потоки космических протонов в интервале энергий 0.7–1.5 ГэВ, зарегистрированные спектрометром ПАМЕЛА в период с 2006 по 2014 г. Потоки космических протонов отбирались в полярных областях околоземной орбиты для исключения влияния магнитосферы Земли на частицы космических лучей.

За выбранный период времени было отобрано 26 форбуш-понижений с амплитудами в диапазоне от 4 до 47%. Амплитуды форбуш-понижений вычислялись относительно усредненного значения потока протонов, вычисленного за неделю до начала эффекта понижения. Самые мощные форбуш-понижения были вызваны массивными КВМ в декабре 2006, марте 2012 и марте 2013 г. Классификация понижений по различным группам со схожими характеристиками не проводилась в предположении, что данная классификация не



**Рис. 2.** Корреляция амплитуды форбуш-понижений с wybranными параметрами межпланетной среды. *a* – Зависимость амплитуды от скорости солнечного ветра, *б* – зависимость амплитуды от модуля межпланетного магнитного поля, *в* – зависимость амплитуды от произведения модуля межпланетного магнитного поля и скорости солнечного ветра.

дает значительного эффекта при анализе изучаемого явления в потоках космических лучей, зарегистрированных непосредственно на орбите Земли. Проведен статистический анализ амплитуд форбуш-понижений в зависимости от скорости солнечного ветра  $V_{CB}$ , модуля магнитного поля  $|B|$  и их произведения  $BSW$  – параметра, предложенного в работе [5]. Экспериментальные данные о скорости солнечного ветра и величине магнитного поля были получены монитором солнечного ветра и магнетометром аппарата ACE, запущенного 25 августа 1997 г. в рамках программы исследования Солнца и космического пространства “Эксплорер”.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На рис. 2 показаны полученные зависимости выбранных параметров от амплитуды форбуш-понижений. Для всех параметров видна положительная корреляция с амплитудой. Коэффициенты корреляции составили 0.78, 0.76 и 0.93 для скорости солнечного ветра, модуля магнитного поля и их произведения соответственно. Из рисунка видно, что наиболее значительный эффект модуляции амплитуды форбуш-понижений связан с совокупностью одновременных изменений ско-

рости солнечного ветра и величины межпланетного магнитного поля. Результаты этого анализа качественно совпадают с дрейфовой моделью распространения космических лучей [6]. Планируется провести моделирование форбуш-понижений в рамках дрейфовой модели для выявления причинно-следственных связей и корреляций с наблюдаемыми эффектами. В дальнейшем будут уточнены параметры процесса и разработаны методы определения его характеристик.

Работа выполнена при поддержке грантом Президента Российской Федерации МК-6160.2018.2 и проектом “Превосходство” НИЯУ МИФИ (контракт 02.a03.21.0005).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cane H.V. // Space Sci. Rev. 2000. V. 93. № 1–2. P. 55
2. Moore R.L., Sterling A.C., Gary G. A. et al. // Space Sci. Rev. 2011. V. 160. P. 73.
3. Richardson I.G., Cane H.V. // J. Geophys. Res. 1995. V. 100. P. 397.
4. Adriani O., Barbarino G.C., Bazilevskaya G.A. et al. // Phys. Rep. 2014. V. 544. P. 323.
5. Belov A.V., Eroshenko E.A., Oleneva V.A. et al. // Adv. Space Res. 2001. V. 27. P. 625.
6. Moraal H. // Space Sci. Rev. 2011. V. 176. № 1–4. P. 299.