

УДК 524.1

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

© 2019 г. И. А. Лагойда¹, *, С. А. Воронов¹, В. В. Михайлов¹

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

*E-mail: 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-

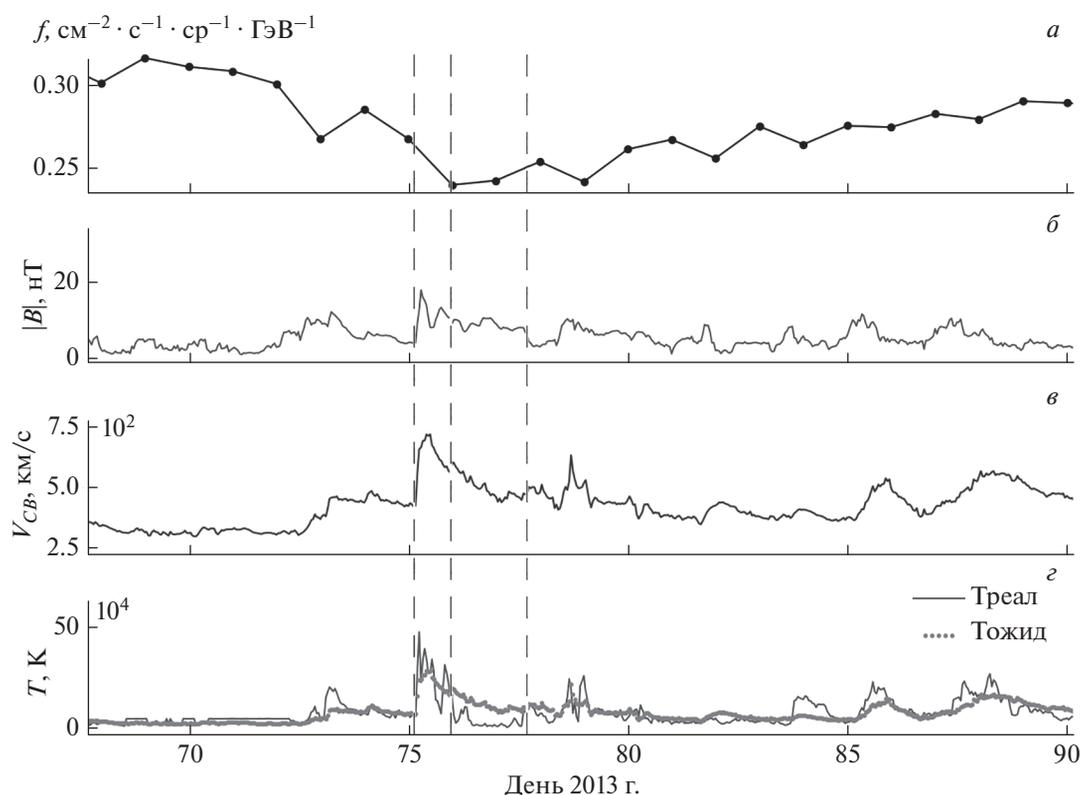


Рис. 1. Форбуш-эффект в марте 2013 г. по данным спектрометра ПАМЕЛА. *a* – Поток космических протонов, $E = 0.7–1.5$ ГэВ; *б* – модуль межпланетного магнитного поля, *в* – скорость солнечного ветра, *г* – температура плазмы солнечного ветра.

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

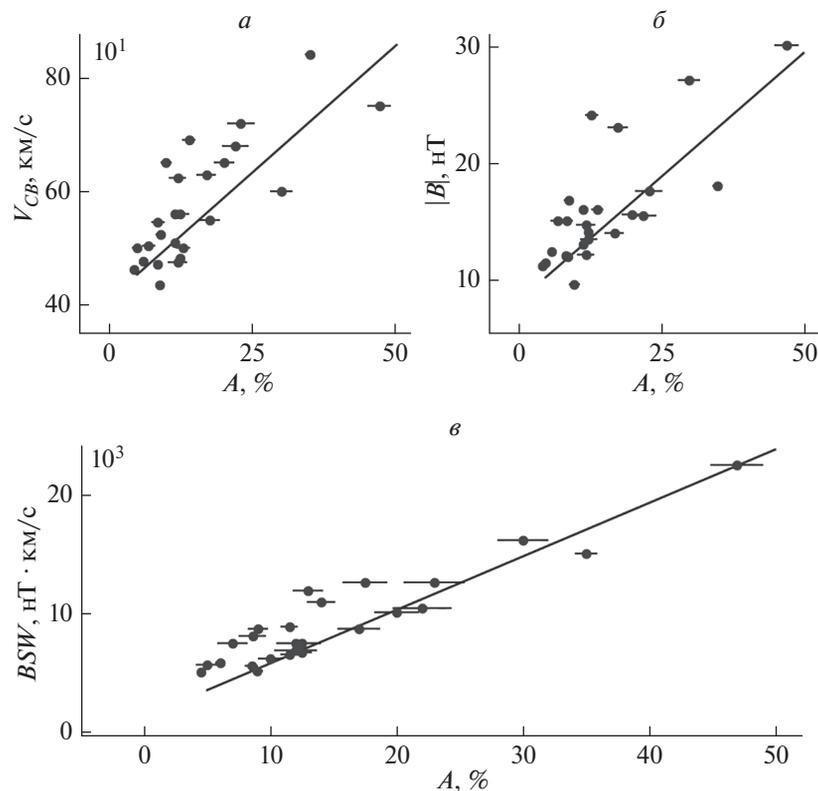


Рис. 2. Корреляция амплитуды форбуш-понижений с wybranными параметрами межпланетной среды. *a* – Зависимость амплитуды от скорости солнечного ветра, *б* – зависимость амплитуды от модуля межпланетного магнитного поля, *в* – зависимость амплитуды от произведения модуля межпланетного магнитного поля и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