

УДК 524.1

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ЗАВИСИМОСТИ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФОРБУШ ПОНИЖЕНИЙ ПО ДАННЫМ СПЕКТРОМЕТРА ПАМЕЛА

© 2021 г. И. А. Лагойда^{1, *}, В. В. Михайлов¹, С. А. Воронов¹, М. Д. Нгобени^{2, 3}

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

²Северо-Западный университет, Центр космических исследований, Потchefструм, Южно-Африканская Республика

³Северо-Западный университет, Школа физико-химических наук, Ммабато, Южно-Африканская Республика

*E-mail: IALagoida@mephi.ru

Поступила в редакцию 21.06.2021 г.

После доработки 05.07.2021 г.

Принята к публикации 28.07.2021 г.

Форбуш понижения проявляются в виде резкого, кратковременного уменьшения регистрируемой интенсивности космических лучей в околоземном и межпланетном пространстве. На сегодняшний день, данный эффект изучается преимущественно при помощи наземной аппаратуры. В работе представлены энергетические зависимости характеристик Форбуш понижения, полученные по данным спектрометра ПАМЕЛА, проводившего измерения потоков частиц космических лучей на орбите Земли в составе спутника Ресурс ДК-1.

DOI: 10.31857/S0367676521110181

ВВЕДЕНИЕ

Впервые Форбуш понижения (ФП) были зарегистрированы С. Форбушем в 1937 г. [1]. ФП являются откликом космического излучения на корональные выбросы масс (КВМ) с поверхности солнечной короны, которые часто сопровождаются солнечными вспышками [2]. КВМ, распространяясь от Солнца, моделируют потоки частиц космических лучей (КЛ) в большом интервале жесткостей. Большое разнообразие КВМ проявляется в большом разнообразии ФП, регистрируемых научной аппаратурой. Несмотря на несколько десятков лет возросшего научного интереса, до сих пор не предложено адекватной теоретической модели, способной количественно описать наблюдаемые профили ФП.

Значительный разброс характеристик ФП обусловлен как различной “мощностью” КВМ, так и различным положением регистрирующей аппаратуры по отношению к движущемуся КВМ. Классический КВМ состоит из ударной волны (УВ), области турбулентности (ОТ) и магнитного облака (МО) [3]. Ударная волна имеет значительно больший угловой растр, чем магнитное облако. Вследствие этого амплитуда локально наблюдаемого ФП помимо распространения полноценного КВМ, может обуславливаться распространением как УВ, так и МО по отдельности [4].

ЭКСПЕРИМЕНТ ПАМЕЛА

В работе используются потоки космических протонов, измеренные спектрометром ПАМЕЛА [5],

проводившим измерения на орбите Земли в течение 10 лет (с июня 2006 г.) в составе спутника Ресурс ДК-1. Спектрометр состоял из времяпролетной системы, магнитного трекера, электромагнитного калориметра, систем антисовпадений и нейтронного детектора. Спектрометр ПАМЕЛА был способен проводить измерения потоков различных частиц КЛ в диапазоне энергий от нескольких сотен МэВ, до нескольких сотен ГэВ.

АНАЛИЗ ДАННЫХ

На сегодняшний день характеристики ФП в основном изучаются с помощью сети наземных нейтронных мониторов, которые регистрируют вторичную компоненту потоков КЛ. Жесткость обрезания частиц КЛ для большинства таких установок ~10 ГВ, в то время как основной эффект ФП проявляется в низкоэнергетической компоненте КЛ.

В потоках космических протонов, зарегистрированных спектрометром ПАМЕЛА, было отобрано более 20 событий ФП с амплитудами в диапазоне от 5 до 32%. Был осуществлен поиск ФП в потоках электронов КЛ, в результате отобрано одно статистически значимое событие, соответствующее ФП, произошедшему в декабре 2006 г., в течение минимума 23-го цикла солнечной активности. Данное ФП детально изучено в работе [6].

Для классификации событий использовалась классическая модель ФП, согласно которой временные профили интенсивности космического

Таблица 1. Основные характеристики КВМ

Дата, UTC	V , км · с ⁻¹	M , г	$t_{УВ}$, UTC	$t_{МО}$, UTC	t_3 , UTC	t_p , сутки
15.03.2013 07:12	1161	$1.3e + 16^2$	17.03.2013 05:21	17.03.2013 14:09	19.03.2013 16:04	~1.37
02.09.2012 04:00	430	$3.6e + 15^2$	04.09.2012 22:02	05.09.2012 05:52	05.09.2012 17:44	~2.3

излучения во время ФП характеризуются двумя стадиями понижения, вызванными прохождением УВ и МО [3]. Для идентификации стадий структуры КВМ во время наблюдаемого ФП использовались данные космического аппарата АСЕ, такие как величина модуля межпланетного магнитного поля, скорость солнечного ветра, а также температура протонной плазмы [7]. В качестве дополнительного критерия определения прохождения МО использовалась эмпирическая зависимость температуры плазмы от скорости солнечного ветра, согласно которой вычислялась ожидаемая температура плазмы космических протонов ($T_{\text{ожд}}$) [8].

Несмотря на значительное количество зарегистрированных событий, большая часть обнаруженных ФП вызваны одновременным распространением в межпланетном пространстве нескольких КВМ, зарегистрированных коронографами SOHO с интервалом всего в несколько дней [9]. Такие ФП не согласуются с классической двухступенчатой моделью ФП, описанной ранее, и могут сопровождаться эффектами наложения различных КВМ друг на друга. Из выборки были также исключены события, вызванные распространением только УВ или МО по отдельности в окрестности Земли. В конечном счете в анализируемой выборке осталось два события, согласующихся с классической моделью генерации ФП.

В табл. 1 показаны основные характеристики КВМ, ответственных за формирование регистрируемых ФП: дата начала КВМ, скорость КВМ на расстоянии $20R_{\text{Солнца}}$, время регистрации ударной волны ($t_{УВ}$), магнитного облака ($t_{МО}$) и время окончания КВМ (t_3) в окрестности Земли, а также время распространения КВМ от Солнца до Земли (t_p). Амплитуды ФП для потока космических протонов ($R = 1-3$ ГВ) показаны в табл. 2. Также в табл. 2 показаны амплитуды наблюдаемых ФП по данным

Таблица 2. Основные характеристики анализируемых ФП

Дата максимума амплитуды ФП	$A_{\text{ПАМЕЛА}}$, %	$A_{\text{Оулу}}$, %	$A_{\text{Магадан}}$, %
19.03.2013	~20	~7	~6
05.09.2012	~15	~5	~4

наземных нейтронных мониторов Оулу и Магадан. Амплитуда ФП вычислялась относительно предшествующего усредненного потока КЛ, соответствующего спокойным условиям, наблюдавшимся до начала КВМ на Солнце. Профили ФП во время фазы восстановления были аппроксимированы с помощью экспоненциальной функции вида:

$$\Phi = 1 - A_{\text{ФП}} \exp((t - t_0)/\tau), \quad (1)$$

где Φ – нормированный поток КЛ, $A_{\text{ФП}}$ – амплитуда ФП, t_0 – время начала ФП, τ – время восстановления ФП. Одно из ФП, зарегистрированное в потоке космических протонов, показано на рис. 1. Полученные зависимости амплитуд и времен восстановления ФП от жесткости показаны на рис. 2.

ОБСУЖДЕНИЯ И ВЫВОДЫ

В работе изучены основные характеристики двух классических ФП, зарегистрированных спектрометром ПАМЕЛА в течении 24-го цикла солнечной активности. Амплитуда ФП, определенная в потоках протонов КЛ ($R = 1-3$ ГВ) в среднем в три раза больше, чем амплитуда тех же событий, вычисленная по данным наземных нейтронных мониторов. Зависимость амплитуды ФП от жесткости частиц для анализируемых событий может быть приближенно описана степенной зависимостью вида:

$$A_{\text{ФП}} \approx 0.2R^{-0.3}. \quad (2)$$

Показатель степени γ для выбранных ФП ~ 0.3 , в то время как показатель степени $\gamma \sim 0.4-1.2$ согласно прежним исследованиям по данным наземных нейтронных мониторов [3].

Дискуссии о зависимости времени восстановления ФП от жесткости ведутся до сих пор. Некоторые исследования в этом направлении завершились выводами о том, что время восстановления ФП не зависит от жесткости частиц КЛ [10, 11]. Однако в других аналогичных исследованиях были обнаружены как ФП, времена восстановления которых имели выраженную зависимость от жесткости, так и не имели таковой [12, 13]. Согласно полученным результатам, время восстановления ФП зависит от жесткости частиц КЛ, только для мощных КВМ скорость распространения которых $V_{\text{КВМ}} \geq 1000$ км · с⁻¹.

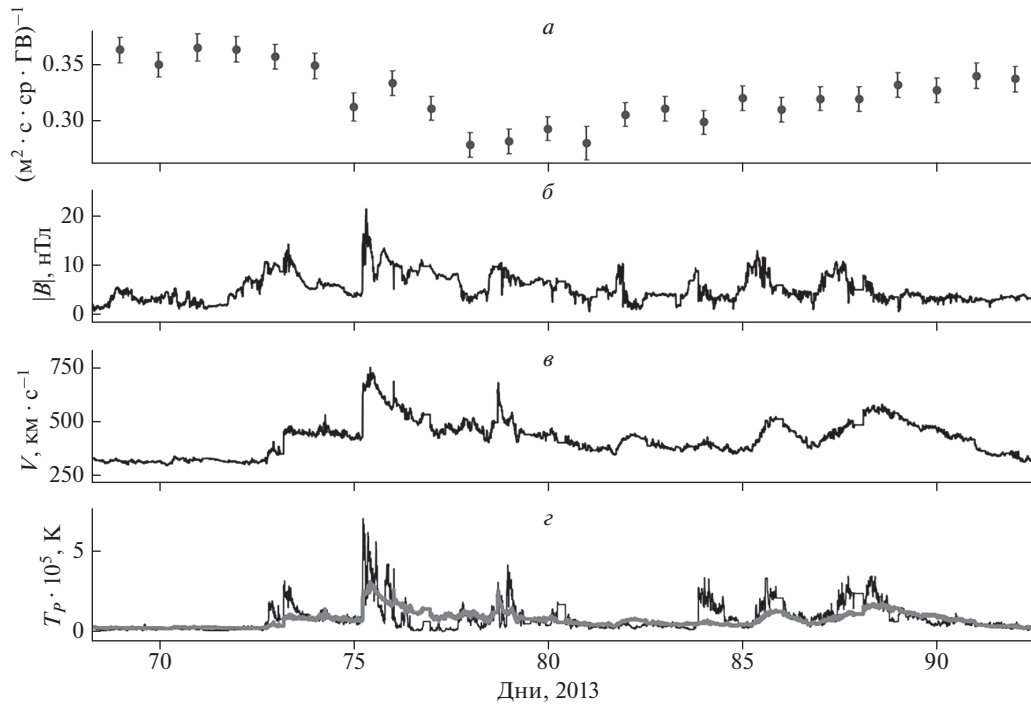


Рис. 1. ФП в потоке космических протонов ($R = 1-3$ ГВ) зарегистрированное спектрометром ПАМЕЛА в марте 2013 г. (а). Временные профили модуля межпланетного магнитного поля (б), скорости солнечного ветра (в), реальной (черная линия) и ожидаемой температура (серая линия) плазмы (г). Значения характеристик межпланетного пространства получены космическим аппаратом ACE [7].

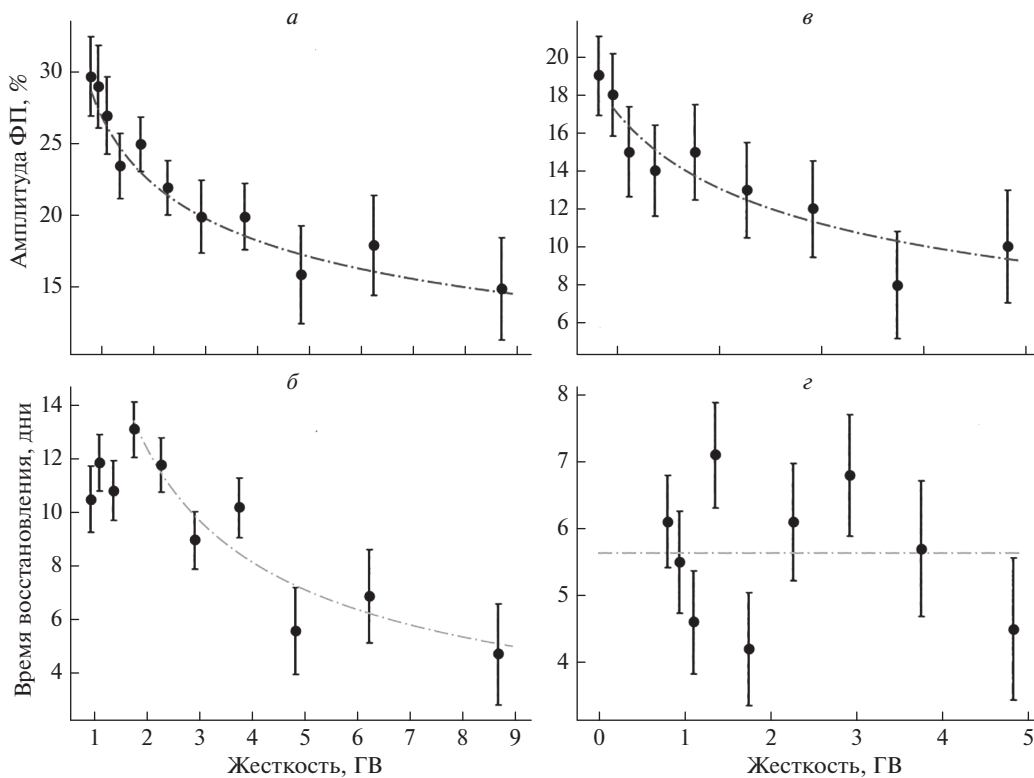


Рис. 2. Зависимости амплитуд (а, в) и времен восстановления (б, г) от жесткости частиц КЛ по данным спектрометра ПАМЕЛА, для двух классических событий ФП в марте 2013 г. (слева) и в сентябре 2012 г. (справа). Зависимость амплитуды от жесткости описана степенной зависимостью $0.27R^{-0.28}$ и $0.17R^{-0.38}$ для события 2013 г. и 2012 г., соответственно, и показана пунктирной линией. Время восстановления дается зависимостью $18.9R^{-0.61}$ в 2013 г. и постоянно для события 2012 г. $\langle \tau \rangle = 5.6$ дн.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект РФФИ-NRF № 19-52-60003_ЮАР-Г) и РНФ (проект № 20-72-10170).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Forbush S.E.* // *Phys. Rev.* 1937. V. 51. P. 1108.
2. *Chen P.F.* // *Liv. Rev. Sol. Phys.* 2011. V. 8. P. 1.
3. *Cane H.V.* // *Space Sci. Rev.* 2000 V. 93. P. 55
4. *Gopalswamy N.* // *Space Sci. Rev.* 2006. V. 124. P. 145.
5. *Galper A.M., Sparvoli R., Adriani O. et al.* // *J. Phys. Conf. Ser.* 2017. V. 798. Art. No. 012033.
6. *Munini R., Boezio M., Bruno A. et al.* // *Astrophys. J.* 2018. V. 853. P. 76.
7. *Garrard T.L., Davis A.J., Hammond J.S., Sears S.R.* // *Space Sci. Rev.* 1998. V. 86. P. 649.
8. *Richardson I.G., Cane H.V.* // *J. Geophys. Res.* 1995. V. 100. P. 397.
9. *Domingo V., Fleck B., Poland A.I.* // *Sol. Phys.* 1995. V. 162. P. 1.
10. *Lockwood J.A., Webber W.R., Jokipii J.R.* // *J. Geophys. Res.* 1986. V. 91. P. 2851.
11. *Wibberenz G., Le Roux J.A., Potgieter M.S., Bieber J.W.* // *Space. Sci. Rev.* 1998. V. 83. P. 309.
12. *Usoskin I.G., Braun I., Gladysheva O.G. et al.* // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 133. Art. No. A07102.
13. *Zhao L.L., Zhang H.* // *Astrophys. J.* 2016. V. 827. P. 13.

Energy dependence of main characteristics of Forbush decreases obtained by PAMELA experiment

I. A. Lagoida^{a,*}, V. V. Mikhailov^a, S. A. Voronov^a, M. D. Ngobeni^{b,c}

^a*National Research Nuclear University MPhI, Moscow, 115409 Russia*

^b*Centre for Space Research, North-West University, 2520 Potchefstroom, South Africa*

^c*School of Physical and Chemical Sciences, North-West University, 2735 Mmabatho, South Africa*

*e-mail: IALagoida@mephi.ru

Forbush decrease is an effect in the cosmic rays physics which manifests itself as a sudden depression of the intensity of cosmic rays in the interplanetary space. Today this effect is mostly studied by ground based detectors such as neutron monitors. These detectors register fluxes of secondary cosmic rays. In this work FDs are studied in the primary cosmic rays fluxes obtained by the PAMELA experiment. The PAMELA experiment was launched on the Earth orbit in June 2006 and continued until 2016.