

УДК 524.1:523.985

ЭФФЕКТИВНОСТЬ МЕХАНИЗМОВ ФОРМИРОВАНИЯ СПОРАДИЧЕСКИХ ФОРБУШ-ПОНИЖЕНИЙ

© 2023 г. А. С. Петухова¹, И. С. Петухов^{1, *}, С. И. Петухов¹

¹Институт космических исследований и астрономии имени Ю.Г. Шафера
Сибирского отделения Российской академии наук — обособленное подразделение
Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра
“Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук”, Якутск, Россия

*E-mail: i_van@ikfia.ysn.ru

Поступила в редакцию 25.12.2022 г.

После доработки 12.02.2023 г.

Принята к публикации 29.03.2023 г.

Из измерений мировой сети нейтронных мониторов в период 1996–2018 гг. выявлено 31 сильное форбуш-понижение ($>5\%$), удовлетворяющих принятому критерию отбора событий. Методом наложения эпох определены согласованные пространственные распределения параметров солнечного ветра и понижения плотности космических лучей. Установлено, что вклады механизмов формирования форбуш-понижения сильно различаются в 2-х группах событий. Различие может быть обусловлено тем, что формирование форбуш-понижения в одной группе происходит в лобовой части, а в другой группе в периферийной части возмущения.

DOI: 10.31857/S0367676523701843, EDN: OSNZZJ

В качестве механизма формирования спорадических форбуш-понижений (ФП) часто привлекают диффузионный механизм. При взаимодействии коронального выброса массы (КВМ) с солнечным ветром увеличивается уровень турбулентности магнитного поля в области перед КВМ [1]. Следствием является ограничение потока КЛ, проходящих вовнутрь КВМ посредством диффузии и, соответственно, формирование ФП. Диффузионный механизм используют также при описании ФП в магнитном облаке (МО) [2]. В этом случае ограничение потока проходящих КЛ объясняют поперечной по отношению к регулярному магнитному полю диффузией КЛ на границе МО. Характеристики ФП, как правило, пространственное распределение понижения плотности КЛ, определяются решением уравнения переноса частиц в диффузионном приближении.

В настоящее время исследуются модели не диффузионного происхождения ФП. Основным элементом моделей является винтовое магнитное поле МО. Критинасам, Руффоло [3] показали, что винтовое поле МО приводит к длительному удержанию КЛ и, тем самым, влияет на поток КЛ внутри МО. Бенелла и др. [4] исследовали влияние винтового поля на формирование ФП. По сравнению сопоставления результатов расчета с измерениями была выявлена определяющая роль дрейфа частиц при формировании ФП в сравнении с вкладом диффузии. Лайтинен и Далла [5]

исследовали переход КЛ между открытыми силовыми линиями межпланетного магнитного поля и закрытыми линиями винтового поля. Получено, что КЛ могут проникать через область Х-точки между открытыми и закрытыми линиями. Переход КЛ происходит быстро и эквивалентен радиальной диффузии, при которой частицы инжектируются на границу области изолированного магнитного поля. Петухов и Петухов [6] разработали кинетический метод расчета распространения КЛ в МО и показали, что понижение интенсивности КЛ определяется, главным образом, геометрией и величиной магнитного поля. Петухова и др. [7] установили электромагнитный механизм формирования ФП в МО. Механизм составляют два процесса: а) потери энергии частиц в электрическом индукционном поле движущегося МО, б) накопление потерь в результате квазизахвата частиц в винтовом магнитном поле МО. Сопоставление результатов расчета характеристик ФП показывает, что амплитуда ФП количественно, а векторная анизотропия качественно соответствуют измерениям [8].

В настоящее время нет общепринятой оценки вклада МО в амплитуду ФП по сравнению с остальной частью возмущения: а) нет вклада [2]; б) вклад незначительный [9]; в) вклад одинаковый [10]. Белов и др. [11] показали, что в 20% событий в МО наблюдается повышение интенсивности КЛ.

Полагаем, что в формировании ФП действуют диффузионный и электромагнитный механизмы. Разделим амплитуду ФП ($A_{\text{ФП}}$) на две части: одна часть формируется под действием диффузионного механизма ($A_{\text{ДМ}}$) в области обтекания солнечного ветра КВМ и части КВМ, предшествующей МО, ее величина зависит от уровня турбулентности магнитного поля; другая часть формируется под действием электромагнитного механизма в МО ($A_{\text{ЭМ}}$), ее величина зависит от величин напряженностей регулярных электрического и магнитного полей. Сумма частей определяет амплитуду ФП $A_{\text{ДМ}} + A_{\text{ЭМ}} = A_{\text{ФП}}$, и их отношение определяет относительный вклад механизмов.

Мы определили согласованные распределения параметров солнечного ветра и плотности числа КЛ методом наложения эпох. В качестве нулевого часа использован момент прихода МО к Земле. Были использованы: база данных OMNI (<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>) для параметров солнечного ветра; база данных ИЗМИРАН (<http://spaceweather.izmiran.ru/eng/dbs.html>) для интенсивности КЛ; каталог Ричардсона и Кейн ([http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/DATA/level3/icmetable2.htm#\(a\)](http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/DATA/level3/icmetable2.htm#(a))) для границ МО в период 1996–2006 гг. и каталог WIND в период 2006–2018 гг. (https://wind.nasa.gov/ICME_catalog/ICME_catalog_viewer.php).

Для анализа были выбраны события, удовлетворяющие следующему критерию: возмущение состоит из ударного фронта, области обтекания КВМ, КВМ с МО; ФП сильное ($A_{\text{ФП}} > 5\%$). За период 1996–2018 гг. было зарегистрировано 31 ФП, удовлетворяющих принятому критерию. В результате анализа получено: а) $A_{\text{ФП}} = 6.01\%$, вклады диффузионного и электромагнитного механизмов почти равны $A_{\text{ДМ}} = 0.44A_{\text{ФП}} = 2.67\%$, $A_{\text{ЭМ}} = 0.56A_{\text{ФП}} = 3.34\%$; б) максимумы напряженностей электрического и магнитного полей располагаются в МО, а максимум уровня турбулентности магнитного поля — за его пределами, что согласуется с принятым предположением о раздельном действии механизмов.

Выбранные ФП мы разделили на 2 группы в зависимости от отношения вкладов механизмов: $A_{\text{ЭМ}} > A_{\text{ДМ}}$ в первой группе, 15 событий и $A_{\text{ЭМ}} < A_{\text{ДМ}}$ во второй группе, 16 событий (рис. 1). Для каждой группы событий провели аналогичный анализ методом наложения эпох. В результате получено: а) в первую группу входят самые сильные ФП, $A_{\text{ФП},1} = 7.44\%$, включая вклады диффузионного механизма $A_{\text{ДМ},1} = 0.205A_{\text{ФП},1} = 1.53\%$ и электромагнитного механизма $A_{\text{ЭМ},1} = 0.795A_{\text{ФП},1} = 5.91\%$; б) средняя амплитуда ФП во второй группе $A_{\text{ФП},2} = 4.78\%$, включая вклады диффузионного механизма $A_{\text{ДМ},2} = 0.78A_{\text{ФП},2} = 3.73\%$ и

электромагнитного механизма $A_{\text{ЭМ},2} = 0.22A_{\text{ФП},2} = 1.05\%$.

Полученные пространственные распределения параметров солнечного ветра в группах существенно различаются: размер области от начала возмущения до МО во второй группе заметно больше. Отсюда можно предположить, что ФП в группах различаются областью формирования: ФП первой группы образуются в лобовой части КВМ, а ФП второй группы образуются на периферии КВМ. В этом случае вклад механизмов в амплитуду ФП зависит от области его формирования.

Таким образом, в течение 23 и 24 солнечных циклов (1996–2018 гг.) было зарегистрировано 31 сильное ФП ($A_{\text{ФП}} > 5\%$). Величина средней амплитуды ФП 6.01% . Вклады диффузионного и электромагнитного механизмов в амплитуду почти равны: $A_{\text{ДМ}} = 0.44A_{\text{ФП}} = 2.67\%$, $A_{\text{ЭМ}} = 0.56A_{\text{ФП}} = 3.34\%$.

В зависимости от области формирования сильные ФП можно разделить на 2 группы. ФП первой группы (15 событий) образуются в лобовой области КВМ, величина средней амплитуды ФП 7.44% , вклад электромагнитного механизма $A_{\text{ЭМ},1} = 0.795A_{\text{ФП},1} = 5.91\%$ превышает вклад диффузионного механизма $A_{\text{ДМ},1} = 0.205A_{\text{ФП},1} = 1.53\%$. ФП второй группы (16 событий) образуются на периферии КВМ, величина средней амплитуды ФП 4.78% , вклад электромагнитного механизма $A_{\text{ЭМ},2} = 0.22A_{\text{ФП},2} = 1.05\%$ меньше вклада диффузионного механизма $A_{\text{ДМ},2} = 0.78A_{\text{ФП},2} = 3.73\%$.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации и Сибирского отделения Российской академии наук (FWRS-2021-0012). Авторы признательны за базу данных ФП, полученную группой исследования космических лучей ИЗМИРАН (<http://spaceweather.izmiran.ru/eng/dbs.html>), базу данных NMDB (www.nmdb.eu), OMNIWeb (<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>), базу данных по околосолнечным межпланетным выбросам корональной массы, составленную Ричардсоном и Кейн (<http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/DATA/level3/icmetable2.htm>) и каталог Wind ICME (https://wind.nasa.gov/ICME_catalog/). /ICME_catalog_viewer.php).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kilpua E., Koskinen H.E.J., Pulkkinen T.I. // Living Rev. Solar Phys. 2017. V. 14. No. 1. P. 5.
2. Lockwood J.A., Webber W.R., Debrunner H. // J. Geophys. Res. 1991. V. 96. P. 11587.
3. Krittinatham W., Ruffolo D. // The Astrophys. J. 2009. V. 704. No. 1. P. 831.
4. Benella S., Laurenza M., Vainio R. et al. // The Astrophys. J. 2020. V. 901. P. 21.

5. *Laitinen T., Dalla S.* // 43rd COSPAR Sci. Assembly. (Sydney, 2021). Art. No. 866.
6. *Петухов И.С., Петухов С.И.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2015. Т. 79. № 5. С. 694; *Petukhov I.S., Petukhov S.I.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2015. V. 79. No. 5 P. 640.
7. *Petukhova A.S., Petukhov I.S., Petukhov S.I.* // The Astrophys. J. 2019. V. 880. P. 17.
8. *Petukhova A., Petukhov I., Petukhov S.* // Space Weather. 2020. V. 18. Art. No. e2020SW002616.
9. *Badraddin, Venkatesan D., Zhu B.Y.* // Solar Phys. 1991. V. 134. P. 203.
10. *Richardson I.G., Cane H.V.* // Solar Phys. 2011. V. 270. No. 2. P. 609.
11. *Белов А.В., Абунин А.А., Абунина М.А. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2015. Т. 79. № 5. С. 691; *Belov A.V., Abunin A.A., Abunina M.A. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2015. V. 79. No. 5. P. 637.

Efficiency of mechanisms for the formation of sporadic Forbush decreases

A. S. Petukhova^a, I. S. Petukhov^{a, *}, S. I. Petukhov^a

^a *Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences — a separate subdivision of the Federal Research Center “Yakutsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences”, Yakutsk, 677027 Russia*

**e-mail: i_van@ikfia.ysn.ru*

From the measurements of the neutron monitors world network in the period 1996–2018, 31 strong Forbush decreases (>5%) were identified that satisfy the accepted event selection criterion. The superposed epoch analyses is used to determine the consistent spatial distributions of the solar wind parameters and the decrease in cosmic ray density. It has been established that the contributions of the formation mechanisms of the Forbush decrease differ greatly in two groups of events. The difference may be since the formation of the Forbush depression in one group occurs in the frontal part, and in the other group in the peripheral part of the disturbance.