

УДК 524.1-352

МОДУЛЯЦИОННАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ КОРОНАЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ С РАЗЛИЧНОЙ СТРУКТУРОЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

© 2021 г. А. В. Белов¹, М. А. Абунина¹, **Е. А. Ерошенко¹**, А. А. Абунин¹,
А. Папаиоанноу², Х. Мавромичалаки³

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н.В. Пушкова
Российской академии наук, Москва, Россия

²Институт астрономии, астрофизики, космических приложений и дистанционного зондирования,
Национальная обсерватория Афин, Пентели, Греция

³Афинский национальный университет имени Каподистриан, Афины, Греция

*E-mail: abunina@izmiran.ru

Поступила в редакцию 24.05.2021 г.

После доработки 01.06.2021 г.

Принята к публикации 28.06.2021 г.

Статистическое исследование межпланетных возмущений, создающих Форбуш-понижения, с различным положением максимума межпланетного магнитного поля. Наиболее эффективны межпланетные возмущения с положением максимума поля через 6–15 ч после начала события.

DOI: 10.31857/S0367676521100070

ВВЕДЕНИЕ

Эффективность различных межпланетных возмущений активно исследуется, поскольку эта тема фундаментально интересна и важна для практики [1–4]. Чаще всего изучается связь структуры межпланетных возмущений с геомагнитной активностью, но немало работ и про влияние структуры корональных выбросов массы (КВМ) на модуляцию космических лучей (КЛ), точнее на свойства Форбуш-понижений (ФП) [2, 4–6].

Полная структура межпланетного возмущения, возникающего в результате КВМ, включает в себя межпланетную ударную волну, собственно выброс и турбулентную зону между ними. Такая структура отражается в двухступенчатости ФП [7–9], где первое понижение связано с приходом ударной волны, а второе – с входом в собственно выброс. При отборе и классификации реальных событий трудно избежать субъективизма. Чтобы уменьшить влияние субъективных факторов, необходимо основывать разделение событий на объективных количественных параметрах.

В данной работе рассматривается связь структуры крупномасштабных межпланетных возмущений с Форбуш-понижениями в галактических космических лучах (ГКЛ). Поскольку ГКЛ – это заряженные частицы, для них самое важное свойство межпланетной среды – магнитное поле. Соответственно, главное в структуре межпланетно-

го возмущения – это распределение магнитного поля. Поэтому в качестве классифицирующего параметра разумно рассмотреть положение максимума напряженности межпланетного магнитного поля (ММП) в возмущении.

Цель работы – выявить особенности и характерные черты межпланетных возмущений с разной структурой, источниками которых были КВМ, основываясь на положении максимума ММП, и понять, как структура наблюдаемых возмущений связана с их эффективностью (способностью создавать ФП в КЛ и возрастания геомагнитной активности).

ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

Нами использовалась база данных Форбуш-эффектов и межпланетных возмущений, созданная в ИЗМИРАН [12], которая содержит данные по основным параметрам КЛ (плотность и анизотропия), полученные методом глобальной съемки для частиц с жесткостью 10 ГВ [10]. Также в ней содержатся основные параметры солнечного ветра (СВ) из [13], данные по ассоциированным солнечным вспышкам [14] и КВМ [16], время регистрации SSC [15] и другие параметры.

В нашей базе данных содержится около 7500 событий. Из них мы выбрали ФП: 1) с SSC; 2) с полными данными по ММП (в основном по этой причине мы ограничились временным периодом 1996–2017 гг.); 3) с отдельными КВМ в каче-

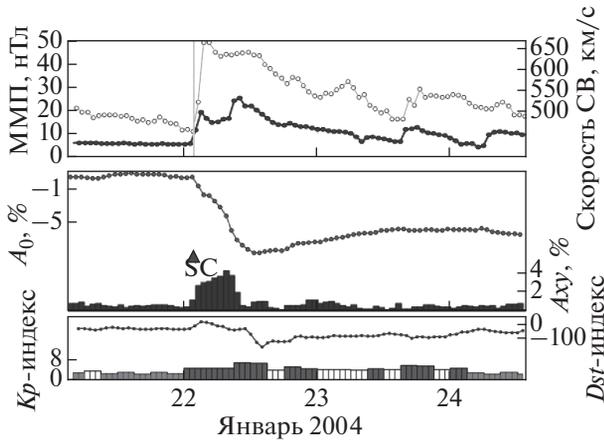


Рис. 1. Поведение основных параметров солнечного ветра, космических лучей и геомагнитной активности во время Форбуш-понижения 22 января 2004 года. Верхняя панель – скорость СВ (правая шкала, верхняя кривая) и ММП (левая шкала, нижняя кривая), средняя панель – изменение плотности КЛ (A_0) (левая шкала, верхняя кривая) и экваториальной составляющей векторной анизотропии КЛ (A_{xy}) (правая шкала, черные столбцы), нижняя панель – изменение геомагнитных данных (D_{st} (правая шкала, верхняя кривая) и K_p (левая шкала, столбцы) индексы). Вертикальная серая линия – момент регистрации SSC.

стве солнечных источников, ассоциированные с солнечными вспышками; 4) “чистые” события, т.е. достаточно далеко отстоящие от соседних. В результате такого отбора осталось только 65 событий. Чтобы увеличить вероятность возмущений с полной структурой, мы выбрали только ФП, связанные с центральными солнечными источниками ($-30^\circ \dots 30^\circ$), и получили 42 достаточно уверенно отождествленных ФП.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные 42 события с центральными источниками были разделены на три подгруппы по времени максимума ММП (t_B): в группу *Early* ($t_B < 6$) попало 21 ФП, в группу *Medium* ($6 \leq t_B \leq 15$) – 10 событий, в группу *Late* ($t_B > 15$) – 11 ФП.

На рисунке 1 приведен пример события из группы *Medium*. На верхней панели рис. 1 указаны поведение скорости СВ и ММП, на средней панели – изменение плотности КЛ (A_0) и экваториальной составляющей векторной анизотропии КЛ (A_{xy}), на нижней панели – изменение геомагнитных данных (D_{st} и K_p индексы). Вертикальная серая линия – момент регистрации SSC.

Форбуш-понижение 22 января 2004 г. началось с регистрации SSC в 01:37 UT. Это было большое событие с амплитудой 9%. КВМ, который явился причиной данного ФП, был очень быстрым ($965 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$) и был связан со вспышкой

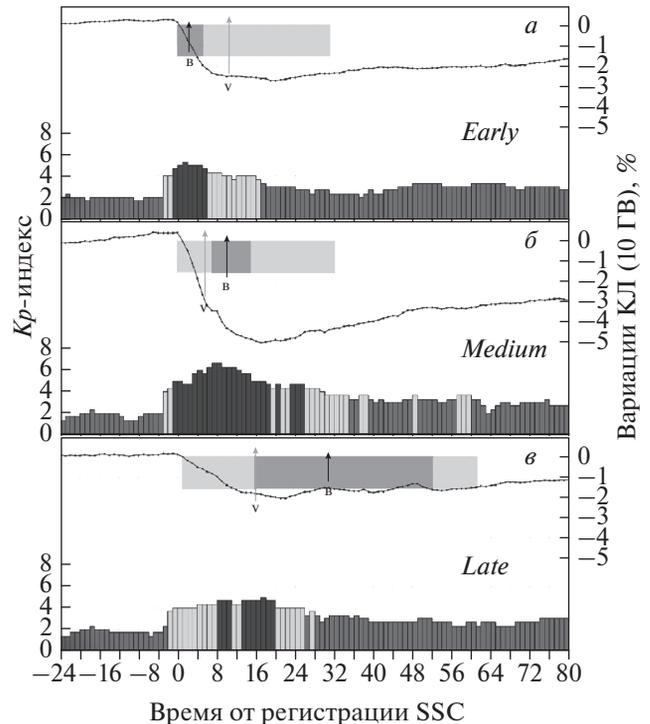


Рис. 2. Усредненное методом наложения эпох (нулевой час – час с SSC) поведение вариаций КЛ с жесткостью 10 ГВ (правая шкала, черная кривая) и K_p – индекса геомагнитной активности (левая шкала, столбцы: серые – $K_p < 4$, светло-серые – $K_p = 4$, темно-серые – $K_p \geq 5$) для различных групп событий: *Early* (а), *Medium* (б), *Late* (в). Стрелками показано среднее для группы положение максимумов напряженности ММП и скорости солнечного ветра. Заштрихованы области распределения этих максимумов.

C5.5 (S13W09) в 22:02UT 19 января. Максимум ММП ($B_{max} = 25.4 \text{ нТл}$) и минимум ФП находятся рядом и достаточно далеко от максимума скорости СВ ($V_{max} = 666 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$). В данном событии зарегистрирована большая геомагнитная буря ($K_{pmax} = 7$, $D_{stmin} = -149 \text{ нТл}$). Экваториальная составляющая векторной анизотропии достигала значения $A_{xy max} = 4.32\%$ в данном событии.

Усредненное поведение параметров в различных группах методом наложения эпох

Рассмотрим усредненное методом наложения эпох поведение вариаций ГКЛ и геомагнитной активности для различных типов КВМ от центральных источников – для групп *Early* (рис. 2а), *Medium* (рис. 2б), *Late* (рис. 2в).

В группе *Early* максимум скорости СВ, чаще всего, отстает от максимума ММП, в остальных – опережает. Распределение максимумов скорости во всех группах широкое, но самое широкое в группе *Late*.

Таблица 1. Усредненные значения основных параметров методом наложения эпох

Группа	A_F , %	K_p max	B_{max} , нТл	$t_{B\ max}$, ч	V_{max} , км · с ⁻¹	$t_{V\ max}$, ч
<i>Early</i>	3.01	5+	18.9 ± 8.0	2.29	564.6 ± 98.8	10.5
<i>Medium</i>	5.4	7	26.4 ± 15.9	10	634.5 ± 183.7	5.5
<i>Late</i>	2.1	5	17.7 ± 5.3	30.9	497.4 ± 85.6	15.7

Таблица 2. Средние значения максимальных величин различных параметров солнечного ветра, геомагнитной активности и космических лучей

	<i>Early</i> ($t_B < 6$)			<i>Medium</i> ($6 \leq t_B \leq 15$)			<i>Late</i> ($t_B > 15$)		
Средние параметры солнечного ветра и геомагнитных индексов									
	Mean	Max	Min	Mean	Max	Min	Mean	Max	Min
B_{max} , нТл	19.15 ± 1.68	34.6	7.5	26.38 ± 5.04	55.8	12.9	17.74 ± 1.60	24.6	9.1
V_{max} , км · с ⁻¹	567.4 ± 20.7	774	449	634.5 ± 58.1	959	391	497.4 ± 25.8	677	409
K_p max	5.24 ± 0.32	7.3	2.3	6.30 ± 0.63	8.7	3.3	5.64 ± 0.31	7.3	4.3
A_p max, нТл	66.14 ± 11.34	154	9	128.70 ± 31.45	300	18	74.00 ± 12.07	154	32
$D_{st\ min}$, нТл	-60.3 ± 7.3	-132	-22	-133.9 ± 40.6	-422	-4	-79.6 ± 13.0	-159	-26
Средние параметры космических лучей									
	Mean	Max	Min	Mean	Max	Min	Mean	Max	Min
A_F , %	3.52 ± 0.50	9.4	0.9	5.66 ± 0.81	12.3	2.7	2.87 ± 0.59	8.9	0.9
D_{min} , %	-0.76 ± 0.11	-1.97	-0.21	-1.15 ± 0.28	-3.40	-0.46	-0.49 ± 0.06	-0.81	-0.16
$A_{xy\ max}$, %	2.00 ± 0.15	3.81	1.15	2.69 ± 0.32	4.35	1.60	1.83 ± 0.12	2.45	1.31
$A_{z\ range}$, %	2.16 ± 0.18	4.51	1.00	2.32 ± 0.23	3.68	0.99	2.55 ± 0.47	5.29	1.34

Самое большое усредненное ФП в группе *Medium* – оно достигает приблизительно 5.4%. Такую величину следовало бы признать очень большой [11] даже для отдельного ФП, а усреднение методом наложения эпох занижает величину Форбуш-понижений. В группе *Early* усредненную величину ФП меньше (3.1%), а в группе *Late* – еще меньше (2.1%).

В группе *Medium* магнитная буря не только самая большая (сильная), она и самая продолжительная – уровень бури (K_p около 5 и выше) держится около суток, а возмущенный уровень (K_p около 4) наблюдается и спустя более двух суток с начала события. В других группах усредненная магнитная буря (малая) заканчивается намного быстрее, особенно в группе *Early* – всего через 6 часов. В группе *Late* геомагнитная активность продолжительнее. Все обсуждаемые параметры сведены в табл. 1.

Усредненные экстремальные параметры

В табл. 2 приведены средние значения различных параметров солнечного ветра, космических

лучей и геомагнитной активности для выделенных групп. Параметры солнечного ветра и геомагнитной активности: B_{max} – максимальное значение интенсивности ММП, V_{max} – максимальное значение скорости СВ в событии, экстремальные значения геомагнитных индексов ($K_p\ max$, $A_p\ max$, $D_{st\ min}$). Параметры КЛ: A_F – величина ФП, D_{min} – максимальное часовое понижение плотности КЛ, $A_{xy\ max}$ – максимальное значение экваториальной составляющей векторной анизотропии КЛ, $A_{z\ range}$ – изменение A_z -составляющей анизотропии КЛ.

Из табл. 2 видно, что группа *Medium* значительно выделяется практически по всем параметрам относительно двух других групп. Она имеет самые высокие средние значения по всем указанным параметрам солнечного ветра (B_{max} , V_{max}) и геомагнитной активности ($K_p\ max$, $D_{st\ min}$). Также в ней находятся самые большие по величине ФП, с самыми большими значениями экваториальной составляющей анизотропии КЛ. Единственный параметр, по которому группу *Medium* превосходит группа *Late* – это изменение A_z -компоненты анизотропии, однако это превышение незначительно (в пределах статистической погрешности).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Время максимума ММП является важным параметром, на основе которого можно классифицировать Форбуш-понижения и связанные с ними возмущения солнечного ветра. События с центральными солнечными источниками были разделены по времени максимального ММП (t_B) на три группы: *Early* ($t_B < 6$), *Medium* ($6 \leq t_B \leq 15$), *Late* ($t_B > 15$). Выявлены существенные различия групп по характеристикам солнечного ветра, геомагнитной активности и космических лучей. Форбуш-понижения с положением максимума ММП через 6–15 ч после начала события сопровождаются самыми выдающимися значениями основных параметров солнечного ветра, геомагнитной активности и космических лучей.

Исследования А.В. Белова, М.А. Абуниной и А.А. Абунина поддержаны РФФ (проект № 20-72-10023).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Gopalswamy N., Akiyama S., Yashiro S. et al. // J. Atm. Solar-Terr. Phys.* 2008. V. 70. P. 245.
2. *Dumbović M., Vršnak B., Čalogović J., Župan R. // Astron. Astrophys.* 2012. V. 538. Art. No. A28.
3. *Chertok I.M., Grechnev V.V., Belov A.V., Abunin A.A. // Solar Phys.* 2013. V. 283. P. 557.
4. *Belov A., Abunin A., Abunina M. et al. // Solar Phys.* 2014. V. 289. P. 3949.
5. *Dumbović M., Vršnak B., Čalogović J., Karlica M. // Astron. Astrophys.* 2011. V. 531. Art. No. A91.
6. *Belov A., Abunin A., Abunina M. et al. // Solar Phys.* 2015. V. 290. P. 1429.
7. *Barnden L. // Proc. 13th ICRC. V. 2. (Denver, 1973).* P. 1277.
8. *Белов А.В., Дорман Л.И., Ерошенко Е.А. и др. // Геомагн. и аэроном.* 1976. Т. 16. № 5. С. 761.
9. *Wibberenz G., Le Roux J.A., Potgieter M.S., Bieber J.W. // Space Sci. Rev.* 1998. V. 83. P. 309.
10. *Belov A., Eroshenko E., Yanke V. et al. // Solar Phys.* 2018. V. 293. P. 68.
11. *Belov A.V., Eroshenko E.A., Oleneva V.A. et al. // Adv. Space Res.* 2001. V. 27. P. 625.
12. <http://spaceweather.izmiran.ru/eng/dbs.html>.
13. <http://omniweb.gsfc.nasa.gov>.
14. <ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/indices/events>.
15. http://isgi.unistra.fr/data_download.php.
16. https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list.

Modulation efficiency of interplanetary coronal mass ejections with different structure of the magnetic field

A. V. Belov^a, M. A. Abunina^{a,*}, E. A. Eroshenko^a, A. A. Abunin^a,
A. Papaioannou^b, H. Mavromichalaki^c

^a*Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of Russian Academy of Sciences, Moscow, 108840 Russia*

^b*IAASARS, National Observatory of Athens, Penteli, 15236 Greece*

^c*National and Kapodistrian University of Athens, Nuclear and Particle Physics Department, Faculty of Physics, Athens, 15784 Greece*

*e-mail: abunina@izmiran.ru

A statistical study of interplanetary disturbances creating Forbush decreases with different positions of the interplanetary magnetic field maximum has been carried out. It is shown that the most effective interplanetary disturbances with the position of the field maximum 6–15 hours after the beginning of the event.