

УДК 524.1-352

ПРОТОННЫЕ ВОЗРАСТАНИЯ И ФОРБУШ-ЭФФЕКТЫ С ОДНИМИ И ТЕМИ ЖЕ СОЛНЕЧНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ

© 2023 г. А. В. Белов¹, Н. С. Шлык¹, *, М. А. Абунина¹, Е. А. Белова¹,
А. А. Абунин¹, А. Папаиоанноу²

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,
Афинская национальная обсерватория, Пентели, Греция

*E-mail: nshlyk@izmiran.ru

Поступила в редакцию 25.12.2022 г.

После доработки 12.02.2023 г.

Принята к публикации 29.03.2023 г.

Сравниваются характеристики Форбуш-эффектов и солнечных протонных событий, вызванных одним и тем же солнечным источником (корональным выбросом массы и связанной с ним солнечной вспышкой). Выбран диапазон гелиодолгот (E04–W35), в котором вспышки ассоциированы как с Форбуш-эффектами, так и солнечными протонными событиями у Земли. Независимо рассматривались солнечные протонные события для разных энергий ($E > 10$, > 100 МэВ) и с разными порогами потоков, а также GLE (наземные возрастания солнечных космических лучей). Результаты проанализированы в сравнении с контрольной группой вспышек в той же гелиодолготной зоне, не приводивших к солнечным протонным событиям. Показано, что корональные выбросы массы, связанные с солнечными протонными событиями, с большой вероятностью вызывают значительный Форбуш-эффект на орбите Земли и геомагнитную бурю. Ускорительная и модулирующая эффективность таких солнечных явлений взаимосвязаны, что, в основном, объясняется высокими скоростями корональных выбросов массы. На практике данные результаты могут применяться для улучшения прогнозов геомагнитных бурь и Форбуш-эффектов.

DOI: 10.31857/S0367676523701776, EDN: OSBGEZ

ВВЕДЕНИЕ

Существует немало исследований, демонстрирующих хорошее согласие между величиной протонных возрастаний со скоростью коронального выброса массы (КВМ) и мощностью сопутствующих рентгеновских вспышек [1–7]. С развитием наземных детекторов и спутниковой электроники появилась возможность уверенного детектирования и выделения солнечных протонных событий (СПС).

Наряду с СПС, Форбуш-эффекты (ФЭ) или Форбуш-понижения – изменения плотности и анизотропии космических лучей (КЛ) [8–12] – часто представляют собой последствия спорадических процессов на Солнце и наблюдаются после выбросов солнечного вещества, ассоциированных с солнечными вспышками. Несмотря на то, что СПС – это события в солнечных КЛ, а ФЭ – в галактических КЛ, оба явления часто связаны с одним и тем же высокоскоростным КВМ. Поэтому между характеристиками этих событий могут существовать статистические связи. Во многих ра-

ботах установлены статистические связи ФЭ с характеристиками вспышек и КВМ [13–15]. В работе [16] показано, что в 23 солнечном цикле КВМ, приведшие к GLE, с большой вероятностью создавали большие ФЭ ($> 7\%$ для частиц с жесткостью 10 ГВ) на орбите Земли и вызывали очень большие магнитные бури. Особенно это оказалось выражено для событий с солнечным источником к востоку от W30.

Целью данной работы является изучение и сравнение характеристик событий, связанных с солнечными вспышками и КВМ, в которых были зарегистрированы как возрастание потока солнечных КЛ (СПС), так и изменение плотности/анизотропии галактических КЛ (ФЭ) в период с 1975 по 2020 гг.

Мы использовали базу данных солнечных вспышек и протонных событий и базу данных Форбуш-эффектов и межпланетных возмущений, созданные в ИЗМИРАН. В эти базы данных собирается всевозможная информация из открытых Интернет-источников о: солнечных вспышках

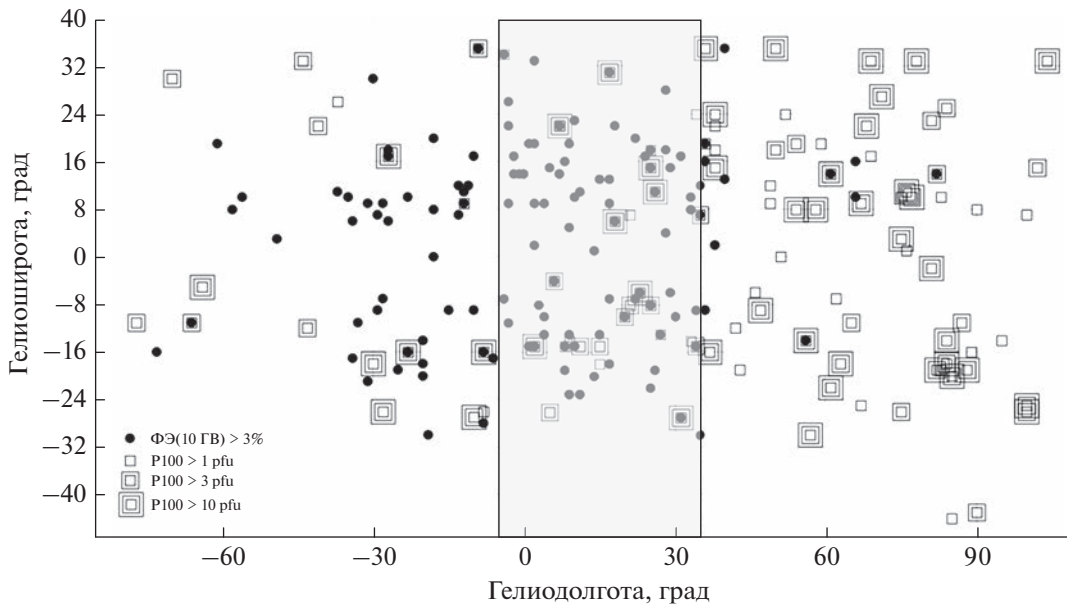


Рис. 1. Распределение долгот солнечных источников, связанных с большими ФЭ (>3%) и протонными возрастаниями (для частиц с энергиями >100 МэВ) с различными максимальными потоками.

(<https://www.ngdc.noaa.gov/stp/space-weather/solar-data/solar-features/solar-flares/x-rays/goes/xrs/>, <http://www.swpc.noaa.gov/ftpdir/lists/xray>, <ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/indices/events>), КВМ (https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list), параметрах межпланетной среды (http://isgi.unistra.fr/data_download.php, <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/>), КЛ (<http://www01.nmdb.eu/>) и геомагнитной активности (ГА) (<ftp://ftp.gfz-potsdam.de/pub/home/obs/kp-ap/wdc/>, <http://wdc.kugi.kyotou.ac.jp/dstdir/index.html>).

Рассмотрим распределение долгот солнечных источников, связанных с протонными возрастаниями с различными максимальными потоками и приведших к регистрации больших ФЭ (>3% для частиц с жесткостью 10 ГВ) (рис. 1). Очевидно, что источники больших ФЭ, в основном, располагаются в центральной зоне (E30–W30), а источники СПС смещены к западу (W20–W80), что согласуется с выводами ранних работ (например, [16]). Поэтому для данного исследования мы ограничились центральным диапазоном долгот (E04–W35), который находится на пересечении двух вышеупомянутых зон (отмечен на рис. 1 затененной областью).

СРАВНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ИССЛЕДУЕМЫХ СОБЫТИЙ

В работе [16] авторы рассматривали только GLE. В настоящем исследовании мы расширили исследуемую выборку и рассмотрели все вспышки в долготном диапазоне E04–W35, после которых были зарегистрированы СПС в 1975–2020 гг. Найденные события были разделены на четыре

группы по величине максимальных потоков СПС для частиц с разными энергиями (здесь и далее по тексту P10 – поток протонов с энергиями >10 МэВ, P100 – поток протонов с энергиями >100 МэВ). Для сравнения была добавлена контрольная группа вспышек из того же долготного диапазона, после которых не последовала регистрация СПС, и в итоге рассматривались следующие пять групп:

- 1) GLE (10 событий, группа GLE);
- 2) $P100 \geq 0.5$ pfu (1 pfu = 1 частица/см² с ср; 29 событий, группа P100);
- 3) $P10 \geq 1$ pfu and $P100 < 0.5$ pfu (39 событий, группа P10);
- 4) $P10 < 1$ pfu и P100 не зарегистрированы (62 события, группа Weak);
- 5) Вспышки, после которых СПС не были зарегистрированы (9564 вспышки, группа Control).

Далее из выделенных событий мы выбрали только те, в которых на Земле сетью нейтронных мониторов были зарегистрированы Форбуш-эффекты, уверенно идентифицированные с солнечным источником.

Средние значения основных параметров солнечного ветра (СВ), межпланетного магнитного поля (ММП), КЛ и ГА для всех выделенных ФЭ (табл. 1, названия групп соответствуют представленным выше, в скобках указано количество событий) показывают, что наиболее мощные межпланетные возмущения связаны с солнечными вспышками и сопутствующими КВМ, после которых были зарегистрированы GLE: в них наблюдаются самые большие значения всех указанных

Таблица 1. Средние значения основных параметров СВ, ММП, КЛ и ГА для исследуемых ФЭ. В скобках указано количество событий в каждой группе

Параметр/ группа	GLE (9)	P100 (20)	P10 (26)	Weak (55)	Control (91)
A_F , %	9.77 ± 1.73	4.29 ± 0.67	5.29 ± 0.71	3.16 ± 0.29	1.84 ± 0.18
Kp_{max}	7.85 ± 0.43	6.57 ± 0.35	6.53 ± 0.35	5.39 ± 0.22	4.78 ± 0.17
Ap_{max}	235.22 ± 39.61	136.00 ± 22.03	136.58 ± 17.86	76.45 ± 7.76	58.00 ± 5.26
Dst_{min} , нТл	-220.3 ± 37.5	-114.2 ± 19.1	-119.6 ± 17.1	-78.5 ± 8.0	-57.8 ± 4.8
B_{max} , нТл	35.13 ± 6.33	22.82 ± 3.11	24.63 ± 2.08	18.68 ± 1.21	14.21 ± 0.66
V_{max} , км/с	1036.9 ± 151.3	698.9 ± 48.9	644.5 ± 32.1	562.9 ± 16.0	492.9 ± 13.3

Таблица 2. Вероятность регистрации (в %) различных величин ФЭ и максимальных геомагнитных индексов после всплывающих событий с определенными характеристиками

Параметр/группа	GLE	P100	P10	Weak	Control
	Вероятность, %				
$A_F < 3\%$	0	50	30.5	56	82.5
$3 \leq A_F < 10\%$	67	50	58	44	17.5
$A_F \geq 10\%$	33	0	11.5	0	0
$Kp_{max} < 5-$	0	10	19.5	32.5	45
$Kp_{max} = 5-...6+$	11	40	19	34.5	41
$Kp_{max} = 7-...8+$	56	40	50	33	14
$Kp_{max} = 9-...9$	33	10	11.5	0	0

параметров. Во время всех межпланетных возмущений из этой группы зарегистрированы магнитные бури (в двух случаях – исключительно большие) и большие ФЭ (от 4.7 до 20.4%); все межпланетные возмущения имели высокие максимальные скорости СВ у Земли (от 669 до 1876 км/с) и большие значения модуля ММП (от 17.5 до 62 нТл).

Поскольку определяющим параметром для создания как СПС, так и ФЭ является скорость соответствующего КВМ, мы рассчитали зависимости амплитуды ФЭ (A_F), Ap и Dst -индексов ГА от транзитной скорости КВМ (V_{tr}) для всех исследуемых событий (рис. 2а–2в). Связь для всех параметров получилась довольно тесная, коэффициенты корреляции следующие: $cc(A_F - V_{tr}) = 0.7 \pm 0.05$, $cc(Ap_{max} - V_{tr}) = 0.68 \pm 0.05$, $cc(Dst_{min} - V_{tr}) = -0.63 \pm 0.05$.

Приведенные выше закономерности позволяют использовать связь СПС с последующими вариациями КЛ и геомагнитными эффектами для прогнозирования состояния космической погоды. Так, например, если после большой солнечной вспышки в центральной зоне с сопутствующим

быстрым КВМ было зарегистрировано GLE, можно ожидать, что на Земле будет зарегистрирована как минимум малая магнитная буря ($Kp = 5$, вероятность 11%), как максимум – исключительно большая ($Kp = 9-...9$, вероятность 33%), самая большая вероятность (55%) регистрации большой или очень большой магнитной бури ($Kp = 7-...8+$). Что касается изменения Dst -индекса, то с вероятностью 77% он будет иметь минимальные значения < -100 нТл, а с вероятностью 55% – ниже -250 нТл. Ожидаемая максимальная скорость СВ во время межпланетного возмущения с вероятностью 71% будет > 900 км/с, а транзитные скорости в 77% случаев будут > 1100 км/с. Максимальное значение ММП с вероятностью 57% будет > 30 нТл. Существует 100% вероятность регистрации ФЭ с величиной не менее 4.5%, а регистрация ФЭ $> 13\%$ произойдет с вероятностью 33%. Возможен (с вероятностью 11%) даже ФЭ $> 20\%$. Мы свели полученные результаты вероятности регистрации ФЭ определенной амплитуды и ГА различного уровня в таблицу (табл. 2) для более удобного использования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подтверждена взаимосвязь ускорительной и модуляционной эффективности высокоскоростных КВМ. Получен прогностический инструмент для определения возможной величины ФЭ и изменения уровня геомагнитной активности, основанный на данных уже начавшегося СПС (координаты вспышки, максимальный поток частиц) и начальной скорости соответствующего КВМ.

Работы Абунина А.А., Абуниной М.А., Белова А.В. и Шлык Н.С. поддержаны Российским научным фондом (проект № 20-72-10023).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kahler S.W.* // J. Geophys. Res. 2001. V. 106. Art. No. 20947.
2. *Bazilevskaya G.A., Sladkova A.I., Svirzhetskaya A.K.* // Adv. Space Res. 2006. V. 37. P. 1421.
3. *Cliver E.W., Ling A.G., Belov A., Yashiro S.* // Astrophys. J. Lett. 2012. V. 756. No. 2. Art. No. L29.
4. *Dierckxens M., Tziotziou K., Dalla S. et al.* // Solar Phys. 2015. V. 290. No. 3. P. 841.
5. *Richardson I.G., von Rosenvinge T.T., Cane H.V.* // Adv. Space Res. 2017. V. 60. P. 755.
6. *Белов А.В.* // Геомагн. и аэроном. 2017. Т. 57. № 6. С. 783; *Belov A.V.* // Geomagn. Aeron. 2017. V. 57. P. 727.
7. *Белов А., Ерошенко Е., Крякунова О. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2015. Т. 79. № 5. С. 615; *Belov A.V., Eroshenko E.A., Kryakunova O.N. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2015. V. 79. No. 5. P. 561.
8. *Forbush S.E.* // Phys. Rev. 1937. V. 51. P. 1108.
9. *Lockwood J.A.* // Space Sci. Revs. 1971. V. 12. No. 5. P. 658.
10. *Belov A.V., Eroshenko E.A., Oleneva V.A. et al.* // Adv. Space Res. 2001. V. 27. P. 625.
11. *Cane H.V.* // Space Sci. Rev. 2000. V. 93. No. 1/2. P. 55.
12. *Абунин А.А., Абунина М.А., Белов А.В., и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2013. Т. 77. № 5. С. 599; *Abunin A.A., Abunina M.A., Belov A.V. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2013. V. 77. No. 5. P. 535.
13. *Чертюк И.М., Белов А.В., Гречнев В.В.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2011. Т. 75. № 6. С. 845; *Chertok I.M., Belov A.V., Grechnev V.V.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2011. V. 75. No. 6. P. 796.
14. *Белов А.В., Ерошенко Е.А., Оленева В.А., Янке В.Г.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2007. Т. 71. № 7. С. 1019.
15. *Papaioannou A., Belov A., Abunina M. et al.* // Astrophys. J. 2020. V. 890. Art. No. 101.
16. *Belov A.V., Eroshenko E.A., Oleneva V.A., Yanke V.G.* // Proc. 31st ICRC (Lodz, 2009). P. 2984.

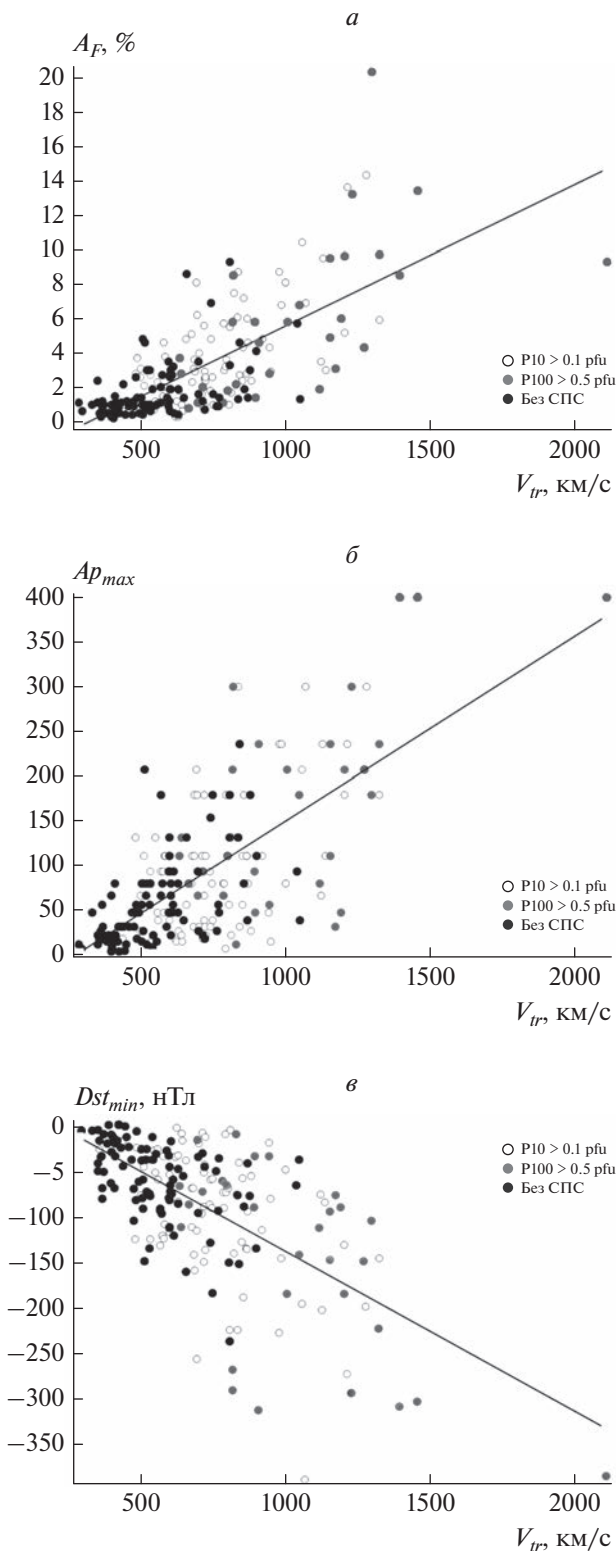


Рис. 2. Связь амплитуды ФЭ A_F для частиц с жесткостью 10 ГВ (а); максимального значения A_p -индекса ($A_{p_{max}}$) (б); минимального значения Dst -индекса (Dst_{min}) (в) с транзитной скоростью соответствующего межпланетного КВМ (V_{tr}).

Solar proton enhancements and Forbush decreases with the same sources

A. V. Belov^a, N. S. Shlyk^{a, *}, M. A. Abunina^a, E. A. Belova^a, A. A. Abunin^a, A. Papaioannou^b
^a*Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, 108840 Russia*

^b*Institute for Astronomy, Astrophysics, Space Applications and Remote Sensing,
National Observatory of Athens, Penteli, 15236 Greece*

**e-mail: nshlyk@izmiran.ru*

The characteristics of Forbush decreases (FDs) and solar energetic particle (SEP) events driven by the same solar sources (i.e. coronal mass ejection and associated solar flare) are investigated. The part of the solar disk (E04–W35) was chosen in which most of the solar events lead both to an FD and SEP event at Earth. SEPs for different energies ($E > 10$, >100 MeV, and ground level enhancements) and with different flux thresholds were considered independently. The obtained results were compared with the control group of solar events that had solar sources within the same longitudinal zone but did not lead to any SEPs. It is shown that coronal mass ejections (CMEs) followed by SEPs have a very high probability to create a large FD in the Earth's orbit and further to cause a geomagnetic storm. It is also obtained that the accelerative and modulating efficiencies of such driving solar events are well correlated; this can be explained mostly by high solar wind speeds of the corresponding CMEs.