

УДК 523.9

ГЕОМАГНИТНЫЕ БУРИ И ФОРБУШ-ПОНИЖЕНИЯ, СВЯЗАННЫЕ С ОДИНОЧНЫМИ И КОМПЛЕКСНЫМИ ТРАНЗИЕНТНЫМИ СТРУКТУРАМИ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

Д. Г. Родькин¹, В. А. Слемзин¹, Ю. С. Шугай²

Рассмотрена геоэффективность одиночных и комплексных спорадических транзитных структур солнечного ветра (СВ), образованных корональными выбросами массы (КВМ), а также связанные с ними Форбуш-понижения потока космических лучей (ФП). На примере периода 2010–2011 гг. показано, что комплексные структуры СВ, образованные в результате взаимодействия КВМ с высокоскоростными потоками из корональных дыр или с другими КВМ в гелиосфере, чаще приводят к умеренным и сильным геомагнитным бурям ($Dst < -50$ нТл) по сравнению с одиночными КВМ. Показано, что величина ФП растет с увеличением произведения длительности транзитной структуры СВ на среднюю магнитуду межпланетного магнитного поля транзидента и принимает наиболее высокое значение с приходом к Земле комплексных структур.

Ключевые слова: Солнце, солнечный ветер, корональные выбросы массы, магнитные бури, Форбуш-понижение.

Спорадические транзитные структуры солнечного ветра (СВ), называемые также межпланетными корональными выбросами массы (МКВМ), фиксируются у Земли в точке Лагранжа L1 и являются проявлениями наблюдаемых в короне Солнца корональных выбросов массы (КВМ).

¹ ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: rodkindg@gmail.com.

² НИИЯФ им. Д. В. Скобельцина МГУ им. М. В. Ломоносова, 119991 Россия, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, 1, с. 2.

МКВМ обладают высокой геоэффективностью, в большинстве случаев приводя к возникновению умеренных и сильных геомагнитных возмущений (с индексом геомагнитной активности $Dst < -50$ нТл) [1–3]. Сила геомагнитных возмущений характеризуется различными индексами, измеряемыми на разных геоширотах. На основе измерений в субавроральной зоне рассчитывается Кр-индекс, характеризующий глобальную возмущенность магнитного поля Земли в 3-часовом интервале времени. В зоне полярных сияний магнитную возмущенность, обусловленную усилением токов в ионосфере, характеризует АЕ-индекс. Чаще всего сила магнитной бури определяется низкоширотным Dst -индексом на основе измерений геомагнитного поля в приэкваториальной зоне [4].

В работе [2] для бурь с $Dst < -50$ нТл в период 1976–2000 гг. были идентифицированы их источники на основе классификации типов течений СВ из статьи [5]. Было определено, что 145 бурь были вызваны областями сжатия перед высокоскоростными потоками (“CIR”), 12 – МКВМ типа магнитного облака, 46 – МКВМ типа “эжекта”, 96 – областями уплотнений плазмы перед МКВМ (или “sheath”) и 165 – МКВМ с областями “sheath”. Было показано, что МКВМ типа магнитного облака наиболее геоэффективны. Однако до сих пор при анализе МКВМ и оценках их геоэффективности не учитывалось образование комплексных структур при взаимодействии потоков в гелиосфере.

Связанные с КВМ транзитные потоки можно разделить на одиночные и комплексные структуры. Одиночные (изолированные) транзиты – спорадические потоки, имеющие один источник и отделенные по времени от других потоков или ударных волн, областей “CIR”, связанных с ними “sheath”. Комплексные (или составные) транзиты образуются в случае взаимодействия различных типов потоков СВ из двух или более источников, в результате которого усиливается ММП и увеличивается длительность структуры, что влияет на ее геоэффективность. В итоге, комплексные структуры могут привести к возникновению наиболее сильных магнитных бурь [6–11]. В статье [9] были рассмотрены примеры геомагнитных бурь и вызывающих их транзитов за период 1998–2002 гг. Было определено, что рассматриваемые бури вызваны: 1) последовательными КВМ (~65%), 2) одиночными КВМ (~22%) и 3) ВСП в областях CIR (~13%). В отмеченных работах идентификация комплексных структур проводилась по магнитным и кинетическим параметрам СВ.

Спорадические потоки СВ часто сопровождаются понижением интенсивности космических лучей [12, 13], которое называют Форбуш-понижением (ФП) или эффектом Форбуша [14]. Данный эффект объясняется повышенным рассеянием галактических

космических лучей (ГКЛ) возмущениями межпланетного магнитного поля (ММП), переносимыми СВ от Солнца.

В данной работе рассматривается геоэффективность (использованы данные Dst -индекса [15]) комплексных транзитных структур СВ, наблюдавшихся в 24-м солнечном цикле в период с января 2010 г. по август 2011 г. [16]. За этот период по данным аппарата ACE [17] было идентифицировано 23 МКВМ: 12 одиночных (“single-source” или SS) и 11 комплексных (“multi-source” или MS) событий. В отличие от более ранних работ, в нашем случае идентификация транзитных структур проводилась не только по магнитоплазменным параметрам, но и по их ионному составу, который определяется условиями формирования КВМ в солнечном источнике и не изменяется при взаимодействиях потоков в гелиосфере. В рассмотренных событиях были выделены 3 типа комплексных структур: 1) структуры, образованные последовательно приходящими друг за другом КВМ (MS1-тип), 2) структуры, образованные взаимодействием быстрого КВМ с медленным (MS2-тип), и 3) структуры, образованные взаимодействием КВМ с высокоскоростным потоком (ВСП) из корональной дыры (MS3-тип).

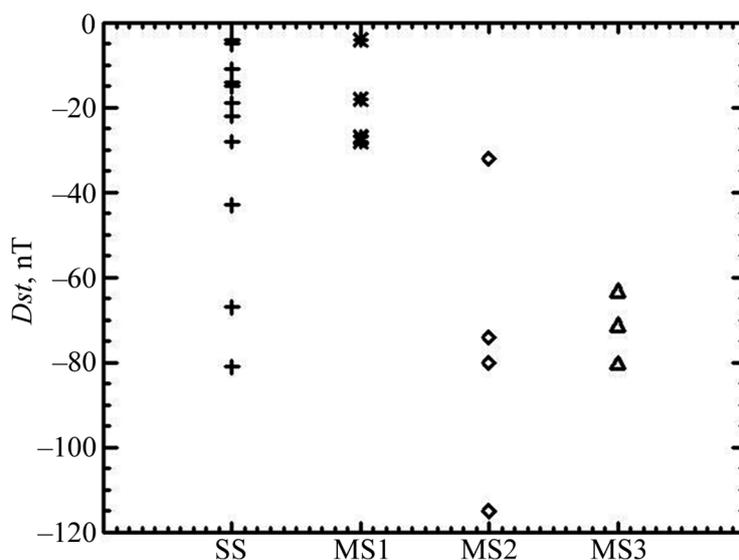


Рис. 1: Связь минимального значения Dst -индекса с типом структуры. Обозначения: SS-тип – крест, MS1 – звезда, MS2 – ромб, MS3 – треугольник.

На рис. 1 показана зависимость минимального значения Dst -индекса от типа возмущающей структуры (SS, MS1, MS2, MS3) для рассматриваемых событий периода 2010–2011 гг. Наиболее геоэффективными ($Dst < -50$ нТл) оказались структуры типа MS2 и MS3. SS и MS1 структуры оказались наименее геоэффективными, т.к. для боль-

шинства из них $Dst > -50$ нТл. Из 12 только 2 одиночные (SS) структуры привели к образованию умеренных магнитных бурь с $Dst < -50$ нТл, а из 4-х MS1 структур ни одно не вызвало магнитную бурю.

Ранее в ряде работ (напр., [1, 6, 11]) отмечалось, что геоэффективность МКВМ зависит от параметров B_s (южная компонента магнитного поля – составляющая вертикальной компоненты B_z : $B_s = -B_z$ при $B_z < 0$ и $B_s = 0$ при $B_z \geq 0$) и произведения vB_s (v – скорость транзientа), имеющего размерность напряженности электрического поля. Мы рассмотрели связь геоэффективности одиночных и комплексных структур с максимальными значениями B_s и произведения vB_s за время транзientа (по измерениям аппарата ACE [17]). В табл. 1 представлены средние значения данных параметров, которые были получены для 4-х типов исследованных транзientов для периода 2010–2011 гг. Наиболее высокие значения vB_s и B_s наблюдались для комплексных структур MS2 и MS3 типов (при этом разность между средними значениями $\langle vB_s \rangle$ и $\langle B_s \rangle$ для MS2+MS3 и для SS+MS1 превосходит ошибки усреднения), что характеризует их большую геоэффективность. Это заключение подтверждается отношением количества структур, приведших к магнитным бурям с $Dst < -50$ нТл, к общему числу структур заданного типа.

Т а б л и ц а 1

Средние параметры максимальных значений vB_s и B_s

для одиночных и комплексных событий за период 2010–2011 гг.

$N_{Dst(-50)}/N_{type}$ – отношение количества структур заданного типа, приведших к магнитным бурям с $Dst < -50$ нТл, к общему числу структур этого типа

	$\langle vB_s \rangle$, мВ/м	$\langle B_s \rangle$, нТл	$(N_{Dst(-50)}/N_{type}) \cdot 100\%$
SS	1.80 ± 1.17	4.6 ± 2.8	17
MS1	1.78 ± 0.32	4.8 ± 0.5	0
MS2	6.45 ± 3.37	12.2 ± 5.2	67
MS3	5.85 ± 1.32	13.2 ± 2.7	100

Корреляция между минимальными Dst -индексами и значениями параметров vB_s и B_s составила по всем типам (SS+MS) событий 0.87 (уровень значимости $\alpha = 0.0001$) и 0.82 ($\alpha = 0.0001$), соответственно. Данные величины согласуются с приведенными для МКВМ в работе [11], где были получены значения 0.83 и 0.82. Таким образом получается, что определяющим параметром при рассмотрении геоэффективности как одиночных, так и комплексных структур является произведение vB_s .

Т а б л и ц а 2

Сопоставление между продолжительностью существования геоэффективных структур (t) и длительностью фазы восстановления магнитного поля Земли после прохождения соответствующих бурь (T)

Тип структуры	Начало	t , час	T , час
SS	05.04.2010 12:00	26	46
SS	12.04.2010 0:00	16	11
MS2	28.05.2010 2:00	69	66
MS2	03.08.2010 18:00	38	44
MS2	05.08.2011 17:00	61	65
MS3	30.04.2010 6:00	66	47
MS3	04.02.2011 1:00	28	20
MS3	28.05.2011 5:00	43	43

Также было проведено сопоставление (табл. 2) между продолжительностью существования геоэффективных структур, вызвавших умеренные и сильные магнитные бури (с минимальным $Dst < -50$ нТл), и длительностью фазы восстановления магнитного поля Земли после соответствующих бурь (период между минимумом Dst и $Dst = -30$ нТл). Как видно из табл. 2, в большинстве случаев комплексные структуры отличает большая продолжительность, при этом длительность фазы восстановления хорошо совпадает с продолжительностью существования геоэффективных структур, кроме одной структуры SS-типа от 05.04.2010 12:00. Таким образом, в большинстве рассмотренных случаев структуры с большей длительностью существования (MS2- и MS3-тип) приводят к бурям с более продолжительной фазой восстановления.

В целом, в работе получено, что рассмотренные нами 23 структуры спровоцировали возникновение 8 (35%) умеренных и сильных магнитных бурь, 6 (26%) из которых были связаны с комплексными структурами, образованными в результате взаимодействия 2-х KBM в гелиосфере (MS2-тип) или взаимодействия KBM с ВСП (MS3-тип). При этом общее число зарегистрированных за рассматриваемый период структур типа MS2 и MS3 составило 7 (30%), а число одиночных KBM – 12 (52%). Таким образом, 86% (или 6 из 7) структур MS2- и MS3-типа – вызвали умеренные и сильные бури, а в случае одиночных, из 12 только 2 (17%) привели к умеренным бурям. В то же время комплексные структуры MS1-типа (последовательно идущие KBM) не привели к возникновению магнитных бурь за рассмотренный период 2010–2011 гг.

Помимо исследования геоэффективности одиночных и комплексных спорадических структур СВ была проанализирована их способность вызывать ФП для периода 2010–2011 гг. Использованы материалы базы данных ФП [18] и данные каталога 23-х транзиентных структур за 2010–2011 гг. [16].

Получено, что 5 из 12 (42%) одиночных и 8 из 11 (73%) комплексных структур, зафиксированных около Земли (в точке L1), сопровождалась ФП. При этом все структуры MS2-типа привели к ФП. Этот результат демонстрирует, что составные структуры чаще, чем одиночные КВМ, вызывают ФП.

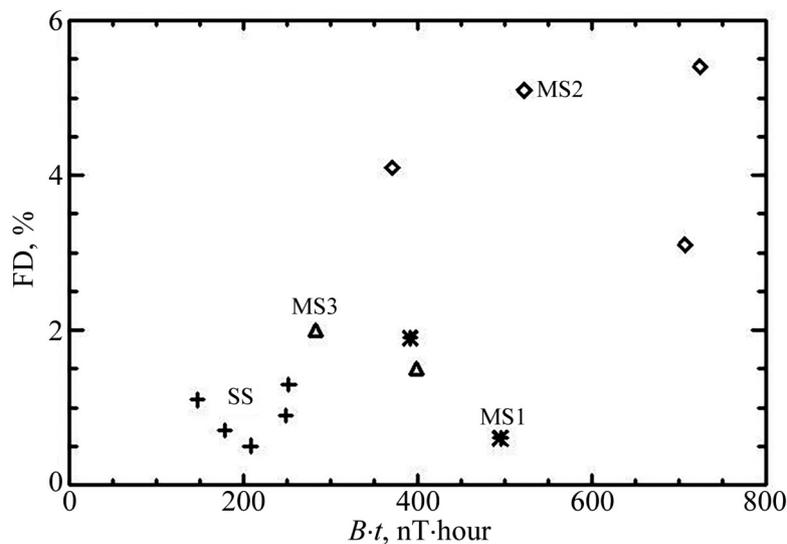


Рис. 2: График зависимости амплитуды ФП (“FD”) от произведения модуля ММП (B) на длительность события (t). Обозначения типов событий соответствуют рис. 1.

На рис. 2 показан график зависимости амплитуды ФП от произведения модуля ММП (B) на длительность события (t). Корреляция между значениями ФП и $B \times t - 0.71$ ($\alpha = 0.007$). Для структур MS2-типа, обладающих высоким значением модуля ММП и большой продолжительностью, наблюдаются более высокие значения ФП. Общая тенденция: высокое среднее значение ММП \times большая длительность события \rightarrow сильное ФП.

Таким образом, на примере 23 спорадических структур СВ за период 2010–2011 гг. получено, что величина ФП растет с увеличением произведения длительности спорадической транзиентной структуры СВ на среднюю магнитуду ММП.

Рассмотренные в работе комплексные структуры MS2- и MS3-типов, связанные с взаимодействующими потоками СВ в период роста 24-го солнечного цикла (январь

2010 г. – август 2011 г.), в среднем имели более высокие значения средней напряженности магнитного поля и поэтому оказались более геоэффективными. Кроме того, такие структуры обладали большой продолжительностью существования, что привело к более длительному периоду повышенной геомагнитной активности и к более высоким значениям ФП. Таким образом, идентификация комплексных структур СВ, образованных в результате взаимодействия потоков в гелиосфере, является важным фактором для прогнозирования космической погоды.

Авторы выражают благодарность “Мировому центру данных по геомагнетизму” (“World Data Center for Geomagnetism”) [14]; “Центру прогнозов космической погоды ИЗМИРАН” [18] и научному коллективу проекта ACE [17] за предоставление доступа к данным. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-12-01567.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] J. Zhang, I. G. Richardson, D. F. Webb, et al., *J. Geophys. Res.* **112**, A10102 (2007); doi: 10.1029/2007JA012321.
- [2] Y. I. Yermolaev, N. S. Nikolaeva, I. G. Lodkina, M. Y. Yermolaev, *J. Geophys. Res.* **117**, A00L07 (2012); doi: 10.1029/2011JA017139.
- [3] M. B. Lawrance, A. Shanmugaraju, Y.-J. Moon, et al., *Solar Phys.* **291**, 1547 (2016); doi: 10.1007/s11207-016-0911-4.
- [4] Л. Л. Лазутин, *Мировые и полярные магнитные бури*. Под ред. Логачева Ю.И. (М., МГУ, 2012).
- [5] Ю. И. Ермолаев, Н. С. Николаева, И. Г. Лодкина, М. Ю. Ермолаев, *Космич. исслед.* **47**(2), 99 (2009); doi: 10.1134/S0010952509020014.
- [6] Y. Wang, C. Shen, S. Wang, P. Ye, *J. Geophys. Res. Lett.* **30**(20), 2039 (2003); doi: 10.1029/2003GL017901.
- [7] C. J. Farrugia, V. K. Jordanova, M. F. Thomsen, et al., *J. Geophys. Res.* **111**, A11104 (2006); doi: 10.1029/2006JA011893.
- [8] C. J. Farrugia, H. Matsui, H. Kucharek, et al., *Advances in Space Res.* **38**, 498 (2006); doi: 10.1016/j.asr.2005.05.051.
- [9] H. Xie, N. Gopalswamy, P. K. Manoharan, et al., *J. Geophys. Res.* **111**, A01103 (2006); doi: 10.1029/2005JA011287.

- [10] N. Lugaz, C. J. Farrugia, J. Geophys. Res. Lett. **41**, 769 (2014); doi: 10.1002/2013GL058789.
- [11] C. Shen, Y. Chi, Y. Wang, et al., J. Geophys. Res.: Space Physics **122**, 5931 (2017); doi: 10.1002/2016JA023768.
- [12] A. Belov, A. Abunin, M. Abunina, et al., Solar Phys. **289**, 3949 (2014); doi: 10.1007/s11207-014-0534-6.
- [13] А. А. Мелкумян, А. В. Белов, М. А. Абунина и др., Солнечно-земная физика **5**(1), 39 (2019); doi: 10.12737/stp-51201904.
- [14] S. Forbush, J. Geophys. Res. **63**(4), 651 (1958); doi: 10.1029/JZ063i004p00651.
- [15] World Data Center for Geomagnetism, Kyoto – URL: <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/wdc/Sec3.html>
- [16] D. Rodkin, V. Slemzin, A. N. Zhukov, et al., Solar Phys. **293**, 78 (2018); doi: 10.1007/s11207-018-1295-4.
- [17] The ACE Science Center (ASC). ACE Level 2 (Verified) Data – URL: <http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/level2/index.html>.
- [18] Центр прогнозов космической погоды ИЗМИРАН – URL: <http://spaceweather.izmiran.ru/>

Поступила в редакцию 28 января 2020 г.

После доработки 10 февраля 2020 г.

Принята к публикации 11 февраля 2020 г.