

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ГЕОМАГНИТНЫХ БУРЬ, СВЯЗАННЫХ С МЕЖПЛАНЕТНЫМИ КОРОНАЛЬНЫМИ ВЫБРОСАМИ МАССЫ

© 2024 г. Д. Г. Родькин^{1,*}, В. А. Слемзин¹

¹Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

*E-mail: rodkindg@gmail.com

Поступила в редакцию 27.09.2023 г.

После доработки 13.11.2023 г.

Принята в печать 27.12.2023 г.

Геомагнитные бури оказывают значительное влияние на работоспособность технических систем как в космосе, так и на Земле. Источниками сильных геомагнитных бурь чаще всего являются межпланетные корональные выбросы массы (МКВМ), порождаемые корональными выбросами массы (КВМ) в солнечной короне. Прогноз МКВМ основан на регулярных оптических наблюдениях Солнца, которые позволяют обнаружить КВМ на стадии формирования. Известно, что интенсивность геомагнитных бурь коррелирует с величиной южной компоненты магнитного поля (B_z) МКВМ. Однако при оперативном прогнозе произвольного КВМ заранее предсказать знак и величину B_z по солнечным наблюдениям пока не удается. В этих условиях предварительный прогноз вероятности развития бури может быть получен в предположении, что сила бури связана с величиной магнитного потока из области эрупции, наблюдаемой как димминг. В данной работе на серии из 37 эруптивных событий 2010–2012 гг. рассматривается связь интегрального магнитного потока из области диммингов с вероятностью того, что КВМ, ассоциированные с ними, вызовут геомагнитные бури. Показано, что наблюдается общий тренд на увеличение геоэффективности МКВМ с повышением величины магнитного потока из области диммингов. Продемонстрировано, что частота наблюдения умеренных и сильных бурь повышается в случаях комплексных событий, связанных с взаимодействием КВМ с другими потоками солнечного ветра в гелиосфере.

Ключевые слова: солнечный ветер, корональные выбросы массы, геомагнитные бури, космическая погода

DOI: 10.31857/S0004629924020094 EDN: KSYVJD

1. ВВЕДЕНИЕ

Межпланетные корональные выбросы массы (МКВМ) являются гелиосферным продолжением корональных выбросов массы (КВМ) на Солнце. МКВМ фиксируются по плазменным параметрам непосредственно на орбите Земли при прохождении потока солнечного ветра (СВ) и отличаются повышенной плотностью, скоростью, напряженностью магнитного поля [1, 2]. Как показано в работе [3], МКВМ можно разделить по их структуре на Sheath + Magnetic Cloud (Sh + MC) или Sheath + Ejecta, где повышенными плотностью и температурой обладает только Sheath, а часть, связанная с MC или Ejecta, имеет пониженные значения.

МКВМ (в особенности Sh + MC и MC) обладают высокой геоэффективностью, т. е. являются наиболее частой причиной возникновения умеренных и сильных геомагнитных бурь [4–6]. Геомагнитные бури, в свою очередь, оказывают сильное влияние на работоспособность космических аппаратов и сложных технических систем на Земле, поэтому растет заинтересованность к их прогнозированию. Поскольку МКВМ обладают максимальной геоэф-

фективностью среди всех типов СВ, одной из важнейших задач прогноза космической погоды является максимально раннее предсказание магнитных бурь на основе данных регулярных солнечных наблюдений.

Один из возможных способов краткосрочного предсказания магнитных бурь представлен, например, в статье [7]. В данной работе продемонстрирован алгоритм прогноза пика наиболее опасных бурь (минимальное значение Dst -индекса) за несколько часов (в среднем 5–6 ч) до начала по данным околоземных наблюдений (в точке L1). В статье было получено, что только в 10% событий выдается ошибочный прогноз (предсказанная магнитуда на 25% больше измерения). Однако авторы отмечают, что их метод позволяет надежно спрогнозировать только магнитуду бури, но не временной профиль и точный момент максимума.

В последнее время для краткосрочных прогнозов космической погоды, в том числе и для предсказания геомагнитных бурь, развиваются методы машинного обучения [8–10]. Например, в статье [10] представлен способ трехдневного прогноза Kp -ин-

декса с применением метода градиентного бустинга, основанный на использовании в качестве входных данных изображений SDO/AIA (193A) и предшествующей временной серии значений Kp -индекса. При оценке качества своего алгоритма при прогнозировании бурь ($Kp \geq 5$) авторы получили точность, равную 0.98, полноту 0.7 и F1-меру (среднее гармоническое между точностью и полнотой) 0.82.

Оперативное среднесрочное (за несколько суток) прогнозирование появления МКВМ обычно ограничивается предсказанием возможного времени и скорости прихода возмущения к Земле, при этом геоэффективность никак не оценивается ([11, 12] и ссылки в них). Отметим, что последние версии наиболее сложных магнитогидродинамических (МГД) моделей солнечного ветра WSA-ENLIL+Conc [13], EUHFORIA [14] также пока не обеспечивают прогнозирование магнитного поля и геоэффективности МКВМ.

Поскольку геоэффективность МКВМ в значительной степени определяется знаком и напряженностью компонента магнитного поля B_z , то наиболее естественно искать ее связь с параметрами магнитного поля в источнике в период формирования КВМ в короне. При этом следует иметь в виду, что в значительном числе случаев (~50%) КВМ взаимодействует с другими КВМ или с высокоскоростными потоками из корональных дыр (ВСП из КД) в короне и гелиосфере, образуя при этом комплексные структуры, регистрируемые на орбите Земли [15–19]. Критерии классификации одиночных и комплексных структур рассмотрены в [17, 18]. На состояние результирующей комплексной структуры могут влиять кинематика, магнитные параметры и временные соотношения взаимодействующих потоков таким образом, что может усилиться напряженность магнитного поля и увеличиться длительность комплекса, что повышает его геоэффективность [20].

Маркерами источника КВМ в короне являются димминги [21, 22], которые являются локальными областями короны с временным понижением уровня излучения в ВУФ спектре и мягком рентгене, что обусловлено падением плотности плазмы в области выброса из-за ухода вещества. Локализация диммингов в центральной части солнечного диска является важным критерием идентификации КВМ, направленных в сторону Земли. При анализе магнитных явлений димминги могут быть использованы для определения области изменения магнитного поля, участвующего в формировании КВМ.

Подробный подход и всесторонний статистический анализ характерных свойств корональных диммингов, измеренных в центре солнечного диска, и их связи с параметрами связанных с ними КВМ и вспышек представлены в цикле работ [22, 23]. Авторы рассматривали выборку из 62 диммингов, наблюдавшихся в центре солнечного диска в период 2010–2012 гг. Их исследования показали, что масса КВМ демонстрирует высокие значения корреляции с площадью диммингов, понижением их полной яркости и суммарным магнитным потоком, а максимальная скорость КВМ коррелирует с соответствующими производными по времени (т. е. скоростью роста площади, скоростью изменения яркости и магнитного потока) с коэффициентом корреляции (КК) 0.6–0.7.

В работе [24] исследовались димминги над солнечным лимбом и их характеристики сравнивались со скоростями и массами ассоциированных с ними КВМ. Было показано, что площадь и яркость надлимбовых диммингов демонстрируют сильную корреляцию с массой КВМ ($KK = 0.82$ и 0.75), тогда как скорости изменения площади и яркости коррелируют со скоростью КВМ ($KK \approx 0.6$).

В работах [25–27] рассматривалась выборка из 50 эруптивных событий за 1997–2006 гг., приведших к геомагнитным бурям с $Dst < -100$ нТ. На основе этой выборки были построены зависимости между индексами геомагнитной активности (Dst , Ap) и величиной суммарного магнитного потока из областей диммингов и постэруптивных аркад. В результате проверки полученных соотношений авторы получили, что между расчетом и измерением $KK \approx 0.5–0.7$ для Dst и $KK \approx 0.7–0.9$ для Ap .

В работе [28] для выборки из 8 КВМ типа магнитных облаков, наблюдавшихся одновременно на STEREO и SDO, удалось успешно смоделировать знак и амплитуду B_z .

Результаты, полученные в указанных работах, показывают, что в выборке по факту геоэффективных КВМ, когда известны входные данные и параметры пришедших к Земле МКВМ, существует высокая степень корреляции между суммарным потоком магнитного поля в областях, затронутых эрупцией (диммингов и аркад), и геоэффективностью МКВМ, определяемой величиной магнитных индексов Dst , Ap и Kp . Однако при оперативном прогнозировании произвольного КВМ эти результаты напрямую не применимы, поскольку заранее не известно, вызовет ли он геомагнитное возмущение.

В настоящее время ведется разработка оперативных моделей среднесрочного прогноза МКВМ,

основанных на регулярных наблюдениях солнечной короны со стороны Земли [11]. Задачей данной работы является проверка возможности оценки вероятности геомагнитного возмущения по интегральной величине потока магнитного поля в области диммингов до эрупции для использования в среднесрочном прогнозе геомагнитной активности. При этом мы не рассматриваем реальную структуру МКВМ в точке L1 около Земли, поскольку она окончательно образуется в результате прохождения МКВМ по гелиосфере и не может быть определена по данным наблюдений в солнечной короне.

2. ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

В качестве исходных брались данные по диммингам и соответствующим магнитным потокам из статьи [23]. Димминги выбирались так, чтобы они находились на диске ($\pm 40^\circ$ от центрального меридиана) с точки наблюдения аппарата SDO, и при этом КВМ, ассоциированные с ними, наблюдались на лимбе со стороны аппаратов STEREO. Выделение границ диммингов проводилось по оптическим данным прибора SDO/AIA. При этом для определения областей затемнения использовался пороговый метод, применяемый к изображениям, которые, в свою очередь, были получены с помощью алгоритма деления кадров после начала эрупции на базовый (до начала выброса) (подробнее в [29]). Магнитные потоки определялись по данным прибора SDO/HMI путем интегрирования в пределах выделенных областей диммингов, при этом потоки в аркадах не учитывались.

Для исследования из рассмотренных в [23] 62 диммингов были отобраны 37 событий за период 2010–2012 гг., для которых можно было поставить в соответствие КВМ из каталога CDAW¹ и сопоставить МКВМ, фиксируемый у Земли по данным OMNI².

Для установления соответствия между диммингами на Солнце и появлением МКВМ у Земли использовалась модель магнитодинамического торможения DBM (Drag-Based model, [30, 31]). Она обеспечивает расчет прибытия МКВМ в точку L1 с погрешностью по времени ≈ 5 –15 ч и по скорости ≈ 20 –50 км/с ([32, 33] и ссылки в них). В качестве начальных данных для расчета использовались скорость КВМ на расстоянии в 20 солнечных радиусов из каталога CDAW и рассчитанное по ней время прихода КВМ в эту точку, а также наиболее вероят-

ные значения фоновой скорости СВ и параметра торможения. Полученное в результате расчета по DBM время в дальнейшем использовалось для определения границ МКВМ на основе параметров СВ из каталога OMNI. МКВМ были идентифицированы по областям с повышенной скоростью и плотностью протонов, повышенной напряженностью магнитного поля, падением протонной температуры ниже ожидаемой, низким значением протонного параметра β плазмы [2, 19, 34].

Проведено сравнение выделенных нами МКВМ с двумя каталогами: каталогом Ричарсона и Кейн (РК-каталог)³ и каталогом Института космических исследований (ИКИ каталог)⁴. 21 из 37 (57%) наших событий пересекается с РК-каталогом. При этом в РК-каталоге за период 2010–2012 гг. всего было выделено 83 МКВМ. В каталоге ИКИ за тот же период выделено 158 МКВМ различной длительности с их разделением на составные части (область сжатия перед выбросом — Sheath и тело выброса — MC/Ejecta). При этом 27 из 37 (73%) наших МКВМ пересекается с событиями типа MC/Ejecta из ИКИ каталога.

Из полученной общей серии событий были выделены 7 КВМ, приводящих к образованию одиночных МКВМ, и 30 КВМ, участвующих в формировании комплексных структур. Тот или иной тип определялся по данным из каталога OMNI. Для комплексных событий, как правило, на временном профиле параметров СВ наблюдается 2 или несколько близких друг к другу пика скорости, плотности или напряженности магнитного поля, связанные со взаимодействующими потоками. Примеры подобных событий представлены в статье [18]. Также стоит отметить, что структуры с большей длительностью (комплексы) приводят к более продолжительным бурям (с долгой фазой восстановления по временному профилю Dst-индекса) [20].

Минимальный Dst , максимальные A_p и K_p для установленных МКВМ были определены по данным из World Data Center for Geomagnetism⁵ и каталогу с сайта GFZ-Potsdam⁶.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

По каталогу CDAW были выделены КВМ, ассоциированные с выбранными нами 37 диммингами, и определены времена ($T_{\text{КВМ}}$) и скорости ($V_{\text{КВМ}}$)

³ <https://izw1.caltech.edu/ACE/ASC/DATA/level3/icmetable2.htm>

⁴ <http://www.iki.rssi.ru/pub/omni/>

⁵ https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_final/index.html

⁶ https://www-app3.gfz-potsdam.de/kp_index/Kp_ap_since_1932.txt

¹ https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/

² <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/>

Таблица 1. Входные и выходные данные DBM модели. $T_{\text{КВМ}}$, $V_{\text{КВМ}}$ — время и скорость КВМ на R20; $T_{\text{ДВМ}}$ — время прихода МКВМ на 1 а. е. по DBM модели; γ — параметр торможения; W — фоновая скорость СВ; $T_{\text{МКВМ}}$ и $V_{\text{МКВМ}}$ — время и скорость измеренных МКВМ

№	$T_{\text{КВМ}}$, УТ	$V_{\text{КВМ}}$, КМ/С	$T_{\text{ДВМ}}$, УТ	$V_{\text{ДВМ}}$, КМ/С	$\gamma \cdot 10^{-7}$, КМ ⁻¹	W , КМ/С	$T_{\text{МКВМ}}$, УТ	$V_{\text{МКВМ}}$, КМ/С
1	01.08.2010 17:20	1300	04.08.2010 03:22	487	0.3	350	03.08.2010 18:00	560
2	07.08.2010 22:09	827	10.08.2010 19:15	455	0.3	350	10.08.2010 18:00	451
3	17.10.2010 05:02	490	20.10.2010 18:11	411	0.3	350	20.10.2010 12:00	409
4	14.02.2011 02:53	793	16.02.2011 18:41	506	0.3	400	16.02.2011 10:00	411
5	15.02.2011 03:53	449	18.02.2011 15:45	449	0.3	450	18.02.2011 02:00	540
6	15.02.2011 07:01	471	18.02.2011 21:16	407	0.3	350	18.02.2011 19:00	494
7	07.03.2011 19:14	632	10.03.2011 22:30	436	0.3	350	10.03.2011 18:00	386
8	26.03.2011 04:28	580	29.03.2011 11:21	428	0.3	350	29.03.2011 23:00	344
9	02.06.2011 11:22	996	05.06.2011 03:39	468	0.3	350	04.06.2011 22:00	490
10	21.06.2011 07:34	708	23.06.2011 23:40	543	0.3	450	23.06.2011 14:00	608
11	03.07.2011 05:53	587	06.07.2011 13:58	428	0.3	350	06.07.2011 17:00	361
12	11.07.2011 23:38	513	15.07.2011 12:55	415	0.3	350	15.07.2011 04:00	436
13	02.08.2011 10:56	596	05.08.2011 11:32	477	0.3	400	05.08.2011 03:00	421
14	03.08.2011 19:04	480	07.08.2011 11:04	408	0.3	350	07.08.2011 02:00	538
15	06.09.2011 06:21	1080	09.09.2011 0:44	441	0.4	350	09.09.2011 12:00	451
16	07.09.2011 04:27	582	10.09.2011 11:54	428	0.3	350	10.09.2011 03:00	489
17	01.10.2011 16:30	394	05.10.2011 18:01	380	0.3	350	05.10.2011 08:00	451
18	25.11.2011 13:01	270	30.11.2011 09:36	351	0.3	400	30.11.2011 00:00	430
19	23.01.2012 05:25	2000	25.01.2012 02:33	590	0.4	450	25.01.2012 06:00	568
20	07.03.2012 01:33	2594	08.03.2012 19:49	603	0.4	450	08.03.2012 12:00	665
21	09.03.2012 07:41	876	11.03.2012 12:25	644	0.4	550	11.03.2012 00:00	435
22	10.03.2012 20:23	1261	12.03.2012 21:17	603	0.3	450	12.03.2012 18:00	584
23	15.03.2012 0:07	436	18.03.2012 08:08	493	0.3	550	18.03.2012 02:00	562
24	24.04.2012 00:15	510	26.04.2012 22:30	553	0.4	600	26.04.2012 00:00	559
25	12.05.2012 03:50	760	15.05.2012 03:03	449	0.3	350	15.05.2012 00:00	408
26	07.06.2012 02:51	473	10.06.2012 19:39	406	0.3	350	10.06.2012 06:00	413
27	14.06.2012 17:20	983	17.06.2012 10:05	467	0.3	350	16.06.2012 22:00	453
28	02.07.2012 21:17	565	05.07.2012 20:00	511	0.3	450	05.07.2012 12:00	457
29	03.07.2012 02:16	478	06.07.2012 18:43	408	0.3	350	06.07.2012 18:00	478
30	04.07.2012 22:04	550	08.07.2012 08:34	422	0.3	350	08.07.2012 18:00	423
31	12.07.2012 20:17	1090	15.07.2012 10:32	474	0.3	350	15.07.2012 06:00	523
32	13.08.2012 20:31	371	17.08.2012 19:30	412	0.4	450	17.08.2012 00:00	382
33	14.08.2012 6:17	804	17.08.2012 15:12	373	0.4	300	18.08.2012 04:00	379
34	15.08.2012 11:33	714	18.08.2012 12:44	444	0.3	350	18.08.2012 15:00	384
35	02.09.2012 09:45	430	06.09.2012 06:40	394	0.3	350	06.09.2012 02:00	431
36	25.09.2012 11:00	470	30.09.2012 00:07	299	0.4	250	30.09.2012 12:00	309
37	28.09.2012 03:28	817	30.09.2012 23:44	455	0.3	350	01.10.2012 00:00	390

выбросов на 20 солнечных радиусах (R20) для дальнейшего расчета времени прихода МКВМ к Земле ($T_{\text{ДВМ}}$) с помощью DBM модели (табл. 1). При этом параметр торможения (γ) выбирался равным от 0.3 до $0.4 \cdot 10^{-7}$ км⁻¹, как наиболее типичный [35, 36]. Фоновая скорость (W) первоначально бралась равной 350 км/с и уточнялась в процессе расчета для

получения минимального расхождения расчетного времени прихода МКВМ с измеренным. В пределах 24 ч от рассчитанного времени по данным кинематических и магнитных параметров (каталог OMNI) были определены временные границы ($T_{\text{МКВМ}}$) измеренных МКВМ и их средняя скорость ($V_{\text{МКВМ}}$). В итоге среднее отклонение между расчетом и наблю-

Таблица 2. Магнитный поток из области диммингов и геоэффективность рассмотренных МКВМ и время предупреждения ($T_{Dst} - T_{КВМ}$)

№	Тип	$\Phi, \cdot 10^{21}$, Мкс	Dst , нТ	A_p	K_p	$T_{Dst} - T_{КВМ}$, дни
1	к	8.29	-74	111	6.67	2.6
2	к	2.37	-28	18	3.33	3.6
3	о	0.93	-14	7	2.00	3.8
4	к	2.90	-18	4	1.00	2.9
5	к	2.97	-32	48	5.00	4.0
6	к	3.80	-30	12	2.67	4.4
7	к	1.45	-80	56	5.33	3.7
8	к	0.12	-5	18	3.33	6.0
9	о	3.15	-45	94	6.33	2.9
10	к	3.15	-30	22	3.67	2.8
11	о	0.93	-28	9	2.33	4.1
12	к	2.05	0	5	1.33	4.5
13	о	2.17	-15	15	3.00	3.0
14	к	4.50	-54	22	3.67	3.6
15	к	3.85	-72	67	5.67	3.7
16	к	7.97	-75	67	5.67	3.3
17	к	1.33	-43	32	4.33	4.3
18	о	2.06	-38	18	3.33	5.6
19	к	2.99	-75	32	4.00	2.3
20	к	8.31	-53	39	4.67	2.0
21	к	3.42	-64	9	2.33	1.9
22	к	7.82	-64	22	3.67	2.0
23	к	2.30	-54	22	3.67	3.5
24	к	0.13	-55	39	4.67	2.4
25	о	3.28	-10	9	2.33	3.4
26	к	0.82	-59	56	5.33	5.2
27	к	10.82	-86	94	6.33	3.0
28	к	3.00	-13	32	4.33	4.0
29	к	3.18	-36	32	4.33	4.1
30	к	0.87	-78	111	6.67	4.9
31	о	9.02	-139	132	7.00	3.0
32	к	0.11	-26	22	3.67	3.6
33	к	0.60	-12	9	2.33	4.2
34	к	0.35	-18	22	3.67	3.8
35	к	6.22	-32	27	4.00	4.1
36	к	0.63	-39	15	3.00	5.8
37	к	2.50	-122	111	6.67	3.2

дением по времени в результате составило $\Delta T \approx 8$ ч, а по скорости $\Delta V \approx 51$ км/с, что согласуется с другими работами [11, 33, 37].

Для каждого найденного МКВМ определялась его геоэффективность на основе 3 индексов геомагнитной активности — Dst , A_p и K_p (табл. 2). Присутствовали примеры как сильных геоэффективных событий с $Dst \approx 140$ нТ, так и тех, что не вызвали никаких бурь ($Dst \approx 0$ нТ). Среднее значение Dst для

всех 37 рассмотренных событий равнялось -46 нТ. 16 из 37 МКВМ привели к понижению Dst ниже -50 нТ. Средняя разница во времени между началом димминга на Солнце и минимальным значением Dst -индекса на Земле составила ≈ 3.5 дня.

Отдельно выделены 7 одиночных МКВМ (о), а также 30 МКВМ (к), входящие в состав комплексных структур (табл. 2). Всего было определено 21 комплексное событие, которое было связано

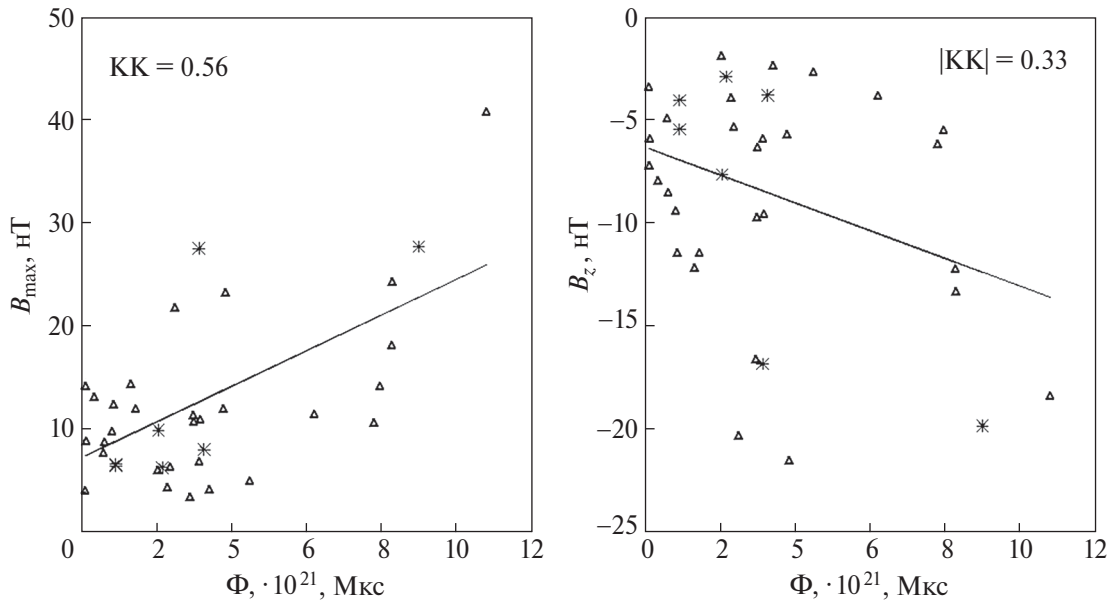


Рис. 1. Слева: график зависимости максимального значения модуля магнитного поля в МКВМ для 37 событий от полного магнитного потока из области диммингов; справа: зависимость минимального значения z -компоненты магнитного поля в МКВМ для 37 событий от полного магнитного потока из области диммингов. Треугольниками выделены МКВМ, входящие в состав комплексов, звездами — одиночные события. KK — коэффициент корреляции.

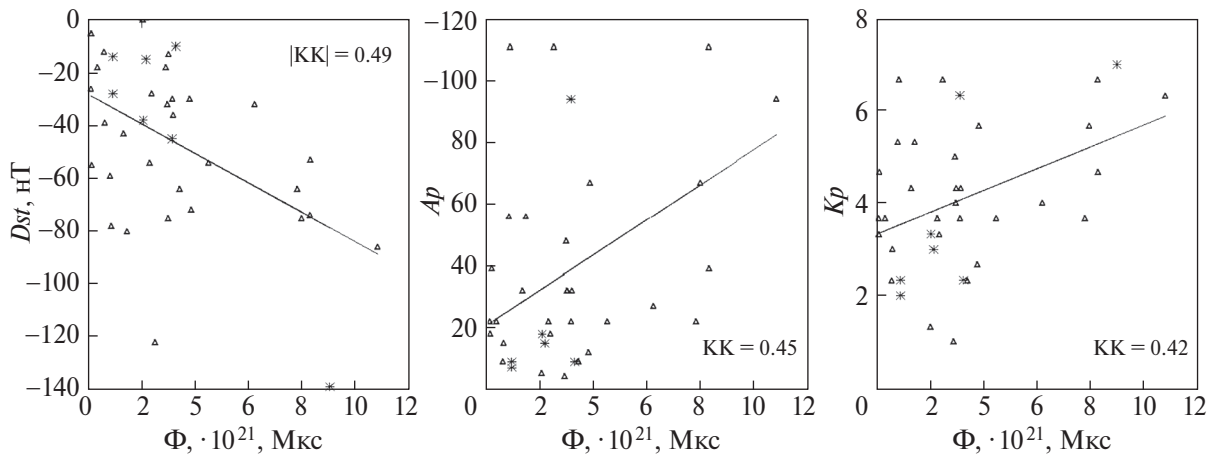


Рис. 2. Слева: график зависимости минимального значения Dst -индекса для 37 событий от полного магнитного потока из области диммингов; по центру: зависимости максимального значения Ap -индекса от полного магнитного потока из области диммингов; справа: зависимости максимального значения Kp -индекса от полного магнитного потока из области диммингов. Треугольниками выделены МКВМ, входящие в состав комплексов, звездами — одиночные события.

с нашим набором. В итоге только 1 из 7 одиночных событий привело к сильной магнитной буре, остальные не вызвали магнитных бурь (или вызвали слабые бури). В свою очередь, 57% (12 из 21) комплексных событий стали причиной умеренных или сильных магнитных бурь.

На рис. 1 приведены зависимости магнитных параметров МКВМ B_{\max} , B_z от магнитного потока. Наибольший коэффициент корреляции (по модулю более 0.4) наблюдается только между магнитным

потокком и максимальным значением модуля магнитного поля (0.56). Скорее всего, это связано с большой долей комплексов в нашей серии событий (30 событий из 37, $\approx 80\%$).

На рис. 2 показаны графики зависимости геомагнитных индексов (Dst , Ap , Kp) от магнитного потока. Для всех трех случаев наблюдается коэффициент корреляции более 0.4 (по модулю).

При разделении событий на одиночные и комплексы получаем результаты, представленные

Таблица 3. Коэффициенты корреляции между магнитным потоком, магнитными параметрами МКВМ и индексами геомагнитной активности для одиночных случаев и событий, входящих в состав комплексов

Тип (число)	Φ vs $ B _{\max}$	Φ vs $B_{z, \min}$	Φ vs Dst	Φ vs A_p	Φ vs K_p
о (7)	0.75	-0.78	-0.92	0.86	0.8
к (30)	0.52	-0.23	-0.38	0.34	0.32
Все (37)	0.56	-0.34	-0.5	0.45	0.42

в табл. 3. Для одиночных (7 событий) получаем высокие значения коэффициентов корреляции между магнитным потоком, магнитными полем и индексами активности. Для КВМ, входящих в состав комплексов (30 событий), высокий коэффициент корреляции сохраняется только между магнитным потоком и максимальным значением модуля магнитного поля (≈ 0.5).

Для определения вероятности возникновения геомагнитных бурь, вызванных КВМ, в зависимости от магнитного потока (Φ) из области диммингов, связанных с этими выбросами, было проведено деление на диапазоны (табл. 4). В клетках указано суммарное число событий для каждого диапазона. По вертикали — величина магнитного потока из области диммингов (Φ , 6 градаций), по горизонтали — три диапазона геомагнитного индекса Dst .

Поскольку рассмотренная нами выборка событий не была связана с заранее известной величиной геоэффективности (в этом смысле является случайной), то отношение числа геоэффективных МКВМ к суммарному числу событий выборки определяет вероятность возникновения геомагнитных бурь.

Из рассмотренных событий меньшая часть МКВМ (16) привела к возникновению умеренных или сильных геомагнитных бурь (вероятность 43%), при этом почти все бури, кроме одной, были связаны с МКВМ, входящими в состав комплексных структур. Большая часть МКВМ (21) не привела к бурям, попав в диапазон с $Dst < -50$ нТ, при этом значительную часть составляли одиночные МКВМ.

В целом наблюдается общий тренд на увеличение геоэффективности МКВМ (т. е. понижение индекса Dst) с повышением величины магнитного потока из области диммингов. Для диапазона $\Phi < 4 \cdot 10^{21}$ Мкс получили, что только 9 из 29 МКВМ привели к магнитным бурям (30% вероятность возникновения бури), а для $\Phi > 4 \cdot 10^{21}$ Мкс имеем 7 из 8 МКВМ, вызвавших умеренные и сильные бури (90% вероятность).

Отметим, что при рассмотрении бурь, связанных с комплексными структурами, использовался магнитный поток, ассоциированный только с одним из образующих комплекс КВМ. Для улучшения точ-

Таблица 4. Распределение числа (о/к) одиночных событий и МКВМ, входящих в состав комплексных структур, в зависимости от диапазона магнитного потока Φ и индекса магнитной активности Dst . В скобках указана вероятность (%) попадания события в указанный диапазон по Dst

Диапазон $\Phi \cdot 10^{21}$, Мкс	Диапазон Dst , нТ		
	$[-50, 0]$	$[-100, -50]$	< -100
0–2	2/6	0/4	0/0
2–4	4/8	0/4	0/1
4–6	0/0	0/1	0/0
6–8	0/1	0/2	0/0
8–10	0/0	0/2	1/0
10–12	0/0	0/1	0/0
Суммарное число (вероятность)	21 (57%)	14 (38%)	2 (5%)

ности прогноза нужен учет других составляющих, для чего необходимо развитие метода предсказания комплексов по начальным солнечным данным.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам оценок для рассмотренной серии событий 2010–2012 гг., предварительный прогноз геомагнитных бурь, вызванных КВМ, может быть сделан на основе абсолютной величины магнитного потока в области димминга за 2–6 суток с момента получения исходных данных до прихода МКВМ в точку L1. Этот интервал времени дает возможность подготовить критически важные системы, например космические аппараты, линии связи и управления к переходу в безопасный режим заблаговременно до наступления бури.

Важно учитывать, что окончательный прогноз геоэффективности зависит не только от характеристик источника, но и от структуры МКВМ, которая может быть уточнена за 2–6 часов до возможной бури по измерениям в точке L1. Данная структура формируется при движении КВМ в гелиосфере и может включать ударную волну (Shock), область сжатия (Sheath) и тело выброса (MC/Ejecta). Исследования геоэффективности различных частей МКВМ можно найти в статьях [3, 4, 38].

Точность предварительного прогноза может быть повышена за счет более полного учета магнитных потоков в комплексных МКВМ, а также при использовании большего числа параметров КВМ и области эрупции и применения алгоритмов машинного обучения.

Поскольку прогноз геоэффективности по данному методу выполняется на основе тех же исходных данных, что и прогноз времени и скорости прихода МКВМ на основе регулярных солнечных наблюдений (см., например, [11]), то предлагаемый метод прогноза геоэффективности может быть адаптирован в общую схему прогноза космической погоды.

Отметим, что полученные значения вероятностей возбуждения геомагнитных бурь относятся к относительно спокойному периоду солнечной активности 24-го цикла. С ростом активности происходит увеличение количества КВМ/МКВМ [4, 19] и величины магнитного потока в области эрупции, что может привести к росту вероятности возникновения умеренных и сильных геомагнитных бурь.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность создателям каталога солнечных событий ИКИ, каталога МКВМ Ричардсону и Кейн, а также составителям баз OMNI и CDAW за предоставление доступа к данным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *I.G. Richardson, and H.V. Cane*, *J. Geophys. Res.* **109**, A09104 (2004).
2. *I.G. Richardson, and H.V. Cane*, *Solar Phys.* **264**, 189–237 (2010).
3. *Ю.И. Ермолаев, Н.С. Николаева, И.Г. Лодкина, М.Ю. Ермолаев*, *Космич. исслед.* **47**, 99–113 (2009).
4. *Ю.И. Ермолаев, И.Г. Лодкина, Н.С. Николаева, М.Ю. Ермолаев*, *Космич. исслед.* **48**, 499 (2010).
5. *Y.I. Yermolaev, N.S. Nikolaeva, I.G. Lodkina, M.Y. Yermolaev*, *J. Geophys. Res.* **117**, A00L07 (2012).
6. *Y.I. Yermolaev, I.G. Lodkina, N.S. Nikolaeva, M.Y. Yermolaev*, *J. Geophys. Res.: Space Physics.* **118**, 4760 (2013).
7. *T.V. Podladchikova, A.A. Petrukovich*, *Space Weather* **10**, S07001 (2012).
8. *Y. Tan, Q. Hu, Z. Wang, Q. Zhong*, *Space Weather* **16**, 406–416 (2018).
9. *I.S. Zhelavskaya, R. Vasile, Y.Y. Shprits, C. Stolle, J. Matzka*, *Space weather* **17**, 1461–1486 (2019).
10. *J. Wang, B. Luo, S. Liu, L. Shi*, *Front. Astron. Space Sci.* **10** (2023).
11. *Y. Shugay, V. Kalegaev, K. Kaportseva, V. Slemzin, D. Rodkin, and V. Ereemeev*, *Universe* **8**, 565 (2022).
12. *M. Temmer, C. Scolini, I.G. Richardson, S.G. Heinemann, et al.*, *Advances in Space Research*. In press (2023).
13. *D. Odstrcil*, *Adv. Space Res.* **32**, 497–506 (2003).
14. *S. Poedts, A. Lani, C. Scolini, C. Verbeke, et al.*, *J. Space Weather Space Clim.* **10**, 57 (2020).
15. *L.F. Burlaga, S.P. Plunkett, O.C. St. Cyr*, *J. Geophys. Res.* **107**, 1266 (2002).
16. *L. Burlaga, D. Berdichevsky, N. Gopalswamy, R. Lepping, T. Zurbuchen*, *J. Geophys. Res.* **108**, 1425 (2003).
17. *N. Lugaz, M. Temmer, Y. Wang, C. J. Farrugia*, *Solar Phys.* **292**, 64 (2017).
18. *D. Rodkin, V. Slemzin, A. N. Zhukov, F. Goryaev, Y. Shugay, I. Veselovsky*, *Solar Phys.* **293**, 78 (2018).
19. *В.А. Слемзин, Ф.Ф. Горяев, Д.Г. Родькин, Ю.С. Шугай, С. В. Кузин*, *Физика плазмы* **45**, 867–902 (2019).
20. *Д.Г. Родькин, В.А. Слемзин, Ю.С. Шугай*, *Краткие сообщения по физике* **47**, 36–43 (2020).
21. *R.A. Harrison, P. Bryans, G.M. Simnett, and M. Lyons*, *Astron. and Astrophys.* **400**, 1071–1083 (2003).
22. *K. Dissauer, A.M. Veronig, M. Temmer, and T. Podladchikova*, *Astrophys. J.* **874**, 123 (2019).
23. *K. Dissauer, A.M. Veronig, M. Temmer, and T. Podladchikova, K. Vanninathan*, *Astrophys. J.* **863**, 169 (2018).
24. *G. Chikunova, K. Dissauer, T. Podladchikova, A.M. Veronig*, *Astrophys. J.* **896**, 17 (2020).
25. *I.M. Chertok, V.V. Grechnev, A.V. Belov, A.A. Abunin*, *Solar Phys.* **282**, 175–199 (2013).
26. *I.M. Chertok, M.A. Abunina, A.A. Abunin, A.V. Belov, V.V. Grechnev*, *Solar Phys.* **290**, 627–633 (2015).
27. *I.M. Chertok, V.V. Grechnev, A.A. Abunin*, *Solar Phys.* **292**, 62 (2017).
28. *S. Pal, D. Nandy, E. Kilpua*, *Astron. and Astrophys.* **665**, A110 (2022).
29. *K. Dissauer, A. M. Veronig, M. Temmer, T. Podladchikova, K. Vanninathan*, *Astrophys. J.* **855**, 137 (2018).
30. *P. J. Cargill*, *Solar Phys.* **221**, 135 (2004).
31. *B. Vršnak, T. Žic, D. Vrbanec, M. Temmer, T. Rollett, C. Möstl, A. Veronig, J. Calogovic, M. Dumbovic, S. Lulic, Y.-J. Moon, and A. Shanmugaraju*, *Solar Phys.* **285**, 295 (2013).
32. *A. Vourlidas, S. Patsourakos, and N. P. Savani*, *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences.* **377**, 20180096 (2019).
33. *M. Dumbovic, J. Calogovic, K. Martinic, B. Vrsnak, D. Sudar, M. Temmer, and A. Veronig*, *Frontiers in Astronomy and Space Sciences.* **8**, 58 (2021).
34. *T. Zurbuchen, I.G. Richardson*, *Space Sci. Rev.* **123**, 31–43 (2006).
35. *J. Čalogović, M. Dumbović, D. Sudar, B. Vršnak, K. Martinić, M. Temmer, and A. Veronig*, *Solar Phys.* **296**, 114 (2021).
36. *Д.Г. Родькин, В.А. Слемзин, Ю.С. Шугай*, *Астрон. журн.* **100**, 1–8 (2023).
37. *P. Riley, M.L. Mays, J. Andries, T. Amerstorfer, et al.*, *Space Weather* **16**, 1245–1260 (2018).
38. *N. Lugaz, C.J. Farrugia, R.M. Winslow, N. Al-Haddad, E.K. J Kilpua, P. Riley*, *J. Geophys. Res.: Space Physics* **121**, 10861–10879 (2016).

PREDICTION OF GEOMAGNETIC STORMS ASSOCIATED WITH INTERPLANETARY CORONAL MASS EJECTIONS

D. G. Rodkin^a, V. A. Slemzin^a

^a*Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

Geomagnetic storms have a significant impact on the performance of technical systems both in space and on Earth. The sources of strong geomagnetic storms are most often interplanetary coronal mass ejections (ICMEs), generated by coronal mass ejections (CMEs) in the solar corona. The ICME forecast is based on regular optical observations of the Sun, which make it possible to detect CMEs at the formation stage. It is known that the intensity of geomagnetic storms correlates with the magnitude of the southern component of the magnetic field (B_z) of the ICME. However, it is not possible yet to predict the sign and magnitude of B_z from solar observations for the operational forecast of an arbitrary CME. Under these conditions, a preliminary forecast of the magnetic storm probability can be obtained under the assumption that the strength of the storm is related to the magnitude of the magnetic flux from the eruption region, observed as dimming. In this paper we examine the relationship between the integral magnetic flux from the dimming region and the probability that CMEs associated with them will cause geomagnetic storms, using a series of 37 eruptive events in 2010–2012. It is shown that there is a general trend toward an increase in the ICMEs geoefficiency with an increase in the magnitude of the magnetic flux from the dimming region. It has been demonstrated that the frequency of moderate and severe storms observation increases in cases of complex events associated with the interaction of CMEs with other solar wind streams in the heliosphere.

Keywords: solar wind, coronal mass ejections, geomagnetic storms, space weather