

УДК 523.9

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВРЕМЕНИ ПРИХОДА КОРОНАЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ МАССЫ НА ОКОЛОЗЕМНУЮ ОРБИТУ ПО ПАРАМЕТРАМ ДИММИНГОВ

© 2024 г. А.А. Вахрушева^{1, 2, *}, К.Б. Капорцева^{1, 2}, Ю.С. Шугай¹,
В.Е. Еремеев¹, В.В. Калегаев^{1, 2}

¹Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына
МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Физический факультет, Москва, Россия

*e-mail: vakhr.anna@gmail.com

Поступила в редакцию 28.09.2023

После доработки 01.12.2023

Принята к публикации 26.12.2023

Проведено моделирование времени прихода корональных выбросов массы (КВМ) на околоземную орбиту по параметрам диммингов из центральной части солнечного диска для событий 2010–2018 гг. Для прогноза межпланетных корональных выбросов масс используется DBM-модель, скорости фонового ветра рассчитаны по модели квазистационарных потоков солнечного ветра, разработанной в НИИЯФ МГУ. Проведено сравнение результатов прогноза межпланетного коронального выброса массы (МКВМ), полученного двумя методами: 1) с использованием начальных скоростей КВМ из базы SASTus по данным коронографа *SOHO/LASCO*; 2) с использованием начальных скоростей, рассчитанных по максимальному скачку яркости димминга, который можно соотнести с КВМ из базы SASTus по времени. Анализ результатов прогноза показал, что оба метода дают сравнимые ошибки прогноза по времени прибытия МКВМ на околоземную орбиту и его скорости. Для исследования возможности прогноза МКВМ, для которого в коронографе по каким-то причинам может не наблюдаться КВМ, проведено моделирование МКВМ по параметрам диммингов. Результаты показали, что в 43% случаев по параметрам диммингов в центральной области солнечного диска, которые не удалось соотнести с КВМ, можно спрогнозировать время прихода МКВМ с точностью 24 ч.

DOI: 10.31857/S0023420624040062, EDN: JJCBBN

ВВЕДЕНИЕ

Наиболее частой причиной сильных геомагнитных возмущений ($Dst \leq -100$ нТл) являются межпланетные корональные выбросы масс (МКВМ) [1] — крупномасштабные магнитоплазменные структуры, наблюдаемые как транзиентные возмущения в солнечном ветре. МКВМ представляют собой проявления корональных выбросов масс (КВМ) в межпланетном пространстве и образуются на Солнце в результате формирования магнитного жгута в короне. Во время распространения МКВМ в гелиосфере из-за взаимодействия с окружающим солнечным ветром на переднем фронте выброса могут образовываться области возмущения — ударные волны (shock) и области сжатия (sheath). Основная часть (тело) МКВМ в зависимости от силы переносимого выбросом магнитного поля может быть классифицирована как магнитное облако или как выброс вещества (ejecta). Магнитные облака с предшествующими им областями сжатия обладают наибольшей геоэффективностью среди всех типов солнечного ветра [2].

Распространение МКВМ в гелиосфере и кинематика процесса зависят от скорости, массы, размеров КВМ, а также от скорости фонового солнечного ветра и коэффициента взаимодействия МКВМ с фоновым ветром (drag parameter) [3]. Существует множество различных моделей распространения МКВМ — эмпирические модели, численные магнитогидродинамические (МГД) модели [4]. В МГД-моделях, таких как WSA-Enlil+Cone [5] или Euphoria [6] используются численные методы для решения МГД-уравнений в различных областях гелиосферы, что позволяет получить трехмерное поле плазменных (скорость, плотность и температура протонов) параметров фонового солнечного ветра в зависимости от времени. В качестве входных данных обычно используются магнитограммы Солнца. КВМ при этом инжектируется в фоновый солнечный ветер с использованием как приближения конуса [7], так и других, например, модели сферомака [8]. Другие модели, например, Effective Acceleration Model (EAMv2) [9] и Shock Arrival Time Model (SARM) [10], используют предположения об ускорении или замедлении КВМ фоновым солнечным ветром. Одной из таких моделей является

Drag-based model (DBM) [11]. В основе этой модели лежит предположение о том, что на определенном расстоянии от Солнца влияние силы Лоренца становится незначительным, и движение МКВМ с этого момента начинает определяться лишь его взаимодействием с окружающим солнечным ветром. Ошибки прогноза DBM-модели сравнимы с магнитогидродинамическими моделями (WSA-ENLIL), но при этом DBM-модель вычислительно менее затратна по сравнению с ними [12].

Одним из ключевых моментов для заблаговременного (2...5 сут) прогноза прихода МКВМ на орбиту Земли является получение входных данных из наблюдений Солнца для используемых моделей распространения МКВМ в гелиосфере. Обработка изображений коронографа дает информацию только о проекции скорости КВМ на картинную плоскость, и используя наблюдения из одной точки невозможно восстановить направление распространения выброса и его точную скорость. Эта проблема решается наблюдением КВМ из нескольких точек гелиосферы, что возможно благодаря миссии *STEREO* [13]. Однако, контакт со *STEREO-B* был потерян, и из-за движения спутников по орбите стерео-наблюдения КВМ, направленных на Землю, возможны только в те моменты времени, когда *STEREO-A* находится на оптимальном угловом расстоянии от Земли, что ограничивает возможности систем краткосрочного непрерывного прогноза КВМ в режиме реального времени. Удобной точкой для стерео-наблюдений является точка Лагранжа *L5* [14], в которую в будущем могут быть отправлены космические аппараты. Альтернативные методы предлагают корректировку вычисляемой по наблюдениям в коронографе скорости КВМ с помощью линейных соотношений или геометрических выкладок [15].

Помимо важности корректировки скорости как таковой, направление распространения КВМ необходимо также для отбора событий, направленных к Земле. Для этой задачи используются данные наблюдений Солнца в рентгеновском и УФ-диапазоне (например, данные камеры *SDO/AIA*), позволяющие найти на солнечном диске активную область, вспышку или корональный димминг, которые можно соотнести с КВМ, и использовать их координаты для определения направления распространения КВМ. Корональные димминги — это кратковременные локальные понижения яркости диска Солнца в жестком ультрафиолетовом и мягком рентгеновском излучении, вызванные понижениями плотности вещества в короне Солнца из-за выброса солнечной плазмы. В различных опубликованных исследованиях обсуждается связь диммингов и КВМ [16, 17]. В ряде работ подробно описан статистический анализ между параметрами диммингов и параметрами КВМ: скоростью, массой, по наблюдениям на диске [18–20] и над

лимбом [21]. Димминги могут содержать в себе информацию о ранней фазе развития КВМ, включая данные о нерадиальной составляющей направления распространения КВМ [22]. Такие данные помогают уточнять модели распространения КВМ в гелиосфере.

В различных работах [23, 24] упоминаются так называемые скрытые КВМ — «stealth CME», для которых сложно найти корональный источник или изображение в коронографе, что связывают как со слабыми событиями, так и с узкими направленными к Земле КВМ, не попадающими в поле зрения коронографа. Последние могут иметь корональный источник, локализованный в центральной части солнечного диска.

Ранее для определения начальной скорости возможного КВМ (на расстоянии $20 R_{\odot}$) по параметрам диммингов были построены корреляционные зависимости между диммингами и сопоставленными с ними КВМ [25]. Полученные зависимости были использованы для моделирования МКВМ с целью оценки времени прибытия на орбиту Земли и скорости МКВМ по параметрам диммингов, расположенных в центральной области диска Солнца за период с 2010 по 2018 гг. Цель настоящей работы — разработка модели заблаговременного (2...5 сут) прогноза прихода МКВМ на околоземную орбиту по данным наблюдений Солнца с тем, чтобы эта модель работала в режиме реального времени. Для моделирования времени и скорости прогноза МКВМ в настоящей работе использовалась модель DBM. В качестве входных параметров для данной модели рассматривались параметры КВМ, наблюдаемые в коронографе. Были выбраны КВМ, которые с большей вероятностью достигнут околоземной орбиты. Для отбора использовались параметры КВМ и их сопоставление с корональными диммингами. Был проведен анализ данных с целью нахождения эмпирического соотношения между максимальным скачком яркости димминга и скоростью КВМ, которое использовалось для оценки скорости КВМ (для этого были взяты параметры 41 димминга и 43 КВМ). На основе полученного соотношения построены модели прогноза МКВМ только по данным корональных диммингов и проанализировано качество прогноза в сравнении с прогнозом по параметрам КВМ. Кроме того, построены модели прогноза МКВМ по параметрам корональных диммингов, расположенных в центральной области диска Солнца, для которых в рамках нашей системы не было отобрано подходящего КВМ по параметрам, времени, и местоположению.

ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

Информация о КВМ (время начала и конца наблюдения, скорость, позиционный угол pa и угол

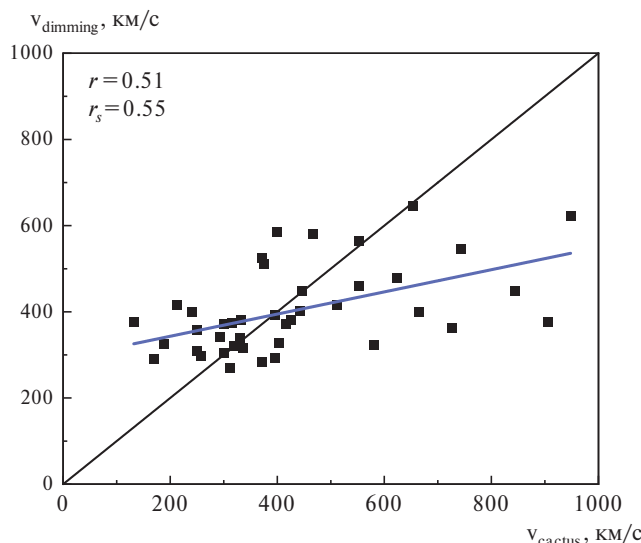


Рис. 1. Соотношение между скоростями КВМ, полученными на разных данных. По оси X — скорости КВМ по данным коронографа; по оси Y — скорости КВМ, рассчитанные по формуле (1); черная линия — $y = x$; r — коэффициент Пирсона; r_s — коэффициент Спирмена.

раствора da КВМ в коронографе) получена из системы автоматического детектирования CACTus (<https://www.sidc.be/cactus>) [26], работающей на данных коронографа *SOHO/LASCO*. Как параметр, характеризующий скорость, выбрана средняя скорость КВМ. Информация о диммингах получена из системы Solar Demon (<https://sidc.be/solardemon/>) [27], в которой параметры диммингов рассчитываются по изображениям с телескопа *SDO/AIA*. Для моделирования и дальнейшего анализа был выбран период с 2010 по 2018 гг. (большая часть 24-го солнечного цикла). Исходные данные из каталога CACTus проходили дополнительную обработку: КВМ из каталога, начинающиеся в одно и то же время в пределах 50 мин, и с перекрывающимися углами, объединялись. Далее исключались узкие КВМ: экваториальные ($60^\circ < pa < 120^\circ$ либо $240^\circ < pa < 300^\circ$) — КВМ считаются узкими, если $da < 30^\circ$; полярные ($pa < 60^\circ$, $120^\circ < pa < 240^\circ$, $pa > 240^\circ$) КВМ считаются узкими при $da < 60^\circ$. Также были исключены из дальнейшего моделирования слабые (с малыми значениями яркости или с малыми изменениями яркости и площади), непродолжительные (короче 10 мин) и заливочные димминги. КВМ и димминги были соотнесены между собой по времени начала и местоположению [28]. В этой работе моделируются события из центральной области диска Солнца (от -10° до 10° долготы, от -15° до 15° широты): всего под эти условия подходит 41 димминг за 2010–2018 гг., которым соответствует 43 КВМ. Причиной этого может быть как визуальная фрагментация единого КВМ, который система считала как несколько событий,

так и явление нескольких КВМ, происходящих одновременно на видимой и обратной сторонах Солнца так, что различить какой из них относится к наблюдаемому диммингу невозможно. Средний угловой растров исследуемых КВМ (da) равен 109° , шесть из них — частичное или полное гало.

Ранее нами было показано [25], что присутствует умеренная зависимость скорости КВМ (средней скорости, измеренной в коронографе по CACTus) от параметров соответствующего димминга (минимальной полной яркости, максимальной площади, максимального скачка яркости). Корреляционные зависимости также были получены в других работах [20, 21], но на других данных (авторы сами занимались обработкой изображений). Основанная на этих корреляциях эмпирическая зависимость была получена и использована для оценки скоростей КВМ, соответствующих диммингам в центральной области диска. Для этой выборки скорость КВМ v зависит от максимального скачка яркости $\maxdrop$ следующим образом:

$$\lg v = 2.22 + 0.20 \cdot \lg \maxdrop. \quad (1)$$

По этой формуле в настоящей работе были рассчитаны скорости соответствующих КВМ из выборки. Для данных событий средняя скорость, рассчитанная в CACTus, составила 433 км/с; средняя скорость, рассчитанная по параметрам диммингов, составила 403 км/с. В рамках модельного представления мы получили, что для низкоскоростных КВМ скорости по диммингам получаются завышенными относительно скоростей, полученных по наблюдениям с коронографа; для высокоскоростных — заниженными, что отображено на рис. 1. Вероятно, это связано с различным количеством КВМ с разными скоростями в не очень большой выборке.

Для моделирования распространения КВМ в гелиосфере использована модель DBM, основанная на следующем выражении для ускорения:

$$a(t) = -\gamma(v - w)|v - w|,$$

где $a(t)$ — ускорение КВМ в данный момент времени; v — его текущая скорость; γ — коэффициент взаимодействия (drag parameter); w — скорость фонового солнечного ветра.

При условии, что γ , w не зависят от t , решение задачи выглядит следующим образом:

$$r(t) = \pm \frac{1}{\gamma} \ln[1 \pm \gamma(v_0 - w)t] + wt + r_0,$$

$$v(t) = \frac{v_0 - w}{1 \pm \gamma(v_0 - w)t} + w,$$

где $r(t)$ — пройденное расстояние, $r_0 = 20 R_\odot$; v_0 — скорость КВМ на расстоянии 20 радиусов Солнца. Знак $\pm$ при этом зависит от того, ускоряется

или замедляется КВМ, т.е. +, если $v_0 > w$, и –, если $v_0 < w$. Значение гамма выбиралось в зависимости от начальной скорости события и составляло $0.5 \cdot 10^{-7} \text{ км}^{-1}$, $0.2 \cdot 10^{-7} \text{ км}^{-1}$ и $0.1 \cdot 10^{-7} \text{ км}^{-1}$ для диапазонов скоростей менее 500 км/с, от 500 до 1000 км/с и более 1000 км/с соответственно. В общем случае параметр гамма описывается соотношением $\gamma = c_d A \rho_w / M + M_v$. Выбор фиксированных значений параметра γ для интервалов скоростей КВМ обусловлен сложностью учета всех параметров КВМ (плотности, массы, размера) в режиме реального времени. В работах нескольких авторов допускается использование постоянного значения γ [11, 29, 30]. Прибытие КВМ на расстоянии $20 R_\odot$ пересчитывалось в приближении равномерного движения. Скорость фонового солнечного ветра рассчитывалась как скорость высокоскоростных потоков, истекающих из корональных дыр, с использованием прогноза по площади корональных дыр (https://swx.sinp.msu.ru/models/solar_wind.php?gcm=1) [31]. Параметры корональных дыр получены с использованием анализа изображений Солнца с *SDO/AIA* в длине волны 19.3 нм. Скорость солнечного ветра считалась постоянной внутри интервалов, разделенных точками 20, 65, 115, 165 и 215 $R_\odot$ – в этих точках происходил пересчет и менялись входные данные DBM-модели. Это сделано для того, чтобы учесть случаи, когда по мере распространения в гелиосфере более быстрые КВМ достигают квазистационарных потоков солнечного ветра с другой скоростью, либо же квазистационарные потоки догоняют более медленные КВМ.

В настоящей работе сравниваются два метода прогноза, использованные для описанной выборки событий. В первом методе используются скорости КВМ, полученные из базы CACTus (далее будем называть его метод 1). Во втором методе начальные скорости КВМ рассчитаны с использованием данных о диммингах по формуле (1) (далее будем называть его метод 2). Такие события считаются распространяющимися равномерно до $20 R_\odot$: начальной точкой для диммингов является $1 R_\odot$, для КВМ – $5 R_\odot$. После этого скорости поступают на вход DBM-модели. Для оценки результатов прогноза проведено объединение каталогов МКВМ (https://swx.sinp.msu.ru/tools/icme_list.php). Объединенный каталог получен путем сопоставления каталога МКВМ Ричардсона и Кейн (<https://izw1.caltech.edu/ACE/ASC/DATA/level3/icmetable2.htm>), списка зарегистрированных у Земли МКВМ с сервиса CCMC CME Scoreboard (<https://kauai.ccmc.gsfc.nasa.gov/CMEscoreboard/>), каталога крупномасштабных типов солнечного ветра ИКИ РАН (отобраны типы, соответствующие КВМ) (<ftp://ftp.iki.rssi.ru/pub/omni/catalog/>). Всего в объединенном каталоге 404 события. Этапы моделирования отображены на рис. 2.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для каждого события вычислены время и скорость прихода МКВМ на орбиту Земли (1 а.е.), далее проводился поиск подходящего события в объединенном каталоге. Ошибка прогноза вычислялась как:

$$dT = T_{\text{прогноз}} - T_{\text{каталог}}, \quad (2)$$

$$dV = V_{\text{прогноз}} - V_{\text{каталог}}. \quad (3)$$

Для анализа результатов прогноза все события были разделены на три группы: false alarm (fa), hit, и hit* [32, 4]. False alarm – события, которые были предсказаны, но не были соотнесены с наблюдаемыми МКВМ из объединенной базы данных по времени прогноза. Hit – события, в которых спрогнозированному МКВМ удалось найти соответствие в каталоге с точностью в 24 ч (т.е., $|dT| < 24 \text{ ч}$). Hit* – события прогноза, в которых одному МКВМ из каталога можно поставить в соответствие несколько спрогнозированных МКВМ.

В таблице 1 приведено сравнение результатов прогноза по двум методам (с использованием скоростей по данным коронографа и с использованием параметров диммингов). Как было описано выше, различие в количестве событий (43 для прогноза по методу 1 и 41 для прогноза по методу 2) обусловлено тем, что некоторым диммингам по нашему алгоритму можно поставить в соответствие несколько КВМ из каталога, что связано с фрагментацией изображения КВМ в коронографе и считыванием их системой CACTus как разные события. Видно, что доля событий hit чуть больше во втором случае (44% против 37%). Для этих

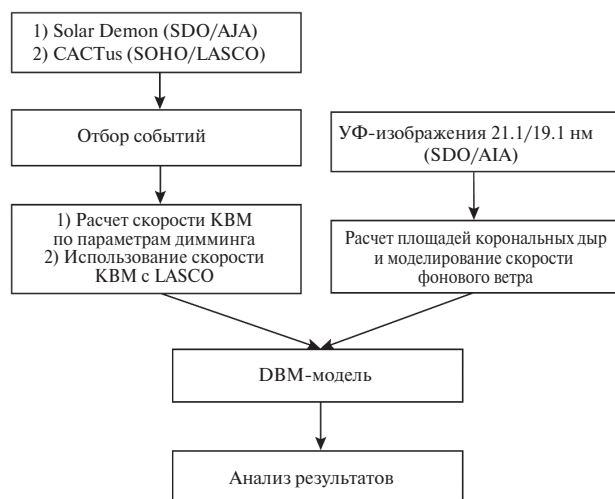


Рис. 2. Схема моделирования с использованием двух методов.

событий прогноз по КВМ в среднем опережает регистрируемый в каталоге МКВМ; прогноз по диммингу запаздывает. При этом стандартное отклонение и средняя абсолютная ошибка по времени меньше для второго метода.

Таблица 1. Сравнение точности прогноза времени прихода КВМ на околоземную орбиту, полученного двумя методами

	Прогноз с использованием скоростей КВМ	
	по САСТus (метод 1)	по данным о диммингах (метод 2)
Все события	43	41
Fa, число событий (доля)	24 (55%)	21 (51%)
Hit число событий (доля)	16 (37%)	18 (44%)
Hit* число событий (доля)	3 (7%)	2 (5%)
$\langle dT \rangle$, ч	−2.1	2.2
min dT , ч	−19.2	−21.7
max dT , ч	22.2	20.5
Стандартное отклонение, ч	12.6	11.9
Средняя абсолютная ошибка, ч	10.0	9.3

Из 16 событий hit для метода 1 и 18 событий hit для метода 2, двумя методами одновременно были предсказаны 11 событий. Из них пять были предсказаны с меньшей ошибкой по методу 1, и 6 по методу 2. Девять событий (82%) предсказано с ошибкой скорости меньше 100 км/с по методу 1, и восемь событий (73%) — по методу 2. Для этого набора событий (общие hit) тоже характерно опережение по первому методу и запаздывание по второму методу относительно времени наблюдения МКВМ в каталоге. При этом скорость солнечного ветра получается завышена по методу 1 и занижена по методу 2 (табл. 2). Среди 11 событий первый метод дал меньшие ошибки прогноза по времени для КВМ с изначально более высокими скоростями (от 512 до 664 км/с), а второй дал меньшие ошибки для более низких скоростей (от 258 до 447 км/с). Это происходит из-за упомянутого ранее найденного соотношения (1) между КВМ и параметром димминга.

Таблица 2. Точность прогноза времени и скорости прихода КВМ на орбиту Земли для событий hit и hit*, рассчитанная по двум методам для набора событий МКВМ, предсказанных двумя методами одновременно

Параметры	Прогноз с использованием скоростей КВМ	
	по САСТus (метод 1)	по данным о диммингах (метод 2)
$\langle dT \rangle$, ч	−4.5	3.0
min dT , ч	−19.2	−17.0
max dT , ч	14.0	20.5
Стандартное отклонение T , ч	12.5	11.6
Средняя абсолютная ошибка, ч	9.5	9.0
$\langle dV \rangle$, км/с	25	−5
min dV , км/с	−185	−185
max dV , км/с	121	128
Стандартное отклонение V , км/с	88	90
Средняя абсолютная ошибка, км/с	66	72

Среди 11 событий, предсказанных двумя методами, встречаются события, вызвавшие как умеренные геомагнитные возмущения, так и слабые (использован минимальный Dst из базы данных OMNI, <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/>). Для слабых геомагнитных возмущений ($Dst > -50$ нТл) по двум методам удачно (hit) спрогнозировано девять событий, для умеренных (-50 нТл $> Dst > -100$ нТл) таких событий два. Причем среди слабых геомагнитных возмущений выше доля событий, которые были лучше спрогнозированы по методу 2 (67%), в то время как все МКВМ, вызвавшие умеренные геомагнитные возмущения, были точнее предсказаны по методу 1 с использованием скоростей КВМ. Среди событий, предсказанных двумя методами по отдельности (16 и 18 для 1-го и 2-го метода соответственно), встречаются также и события, вызвавшие сильные геомагнитные возмущения ($Dst < -100$ нТл). Распределение событий по силе геомагнитного возмущения для двух методов представлено на рис. 3. Опять же, для слабых возмущений больше событий лучше спрогнозированных по методу 2, а все сильные события были предсказаны лучше по методу 1. Вероятная причина этого — заниженная оценка скорости по параметрам димминга более быстрых геоэффективных КВМ, которые с большей вероятностью приведут к более сильной магнитной буре.

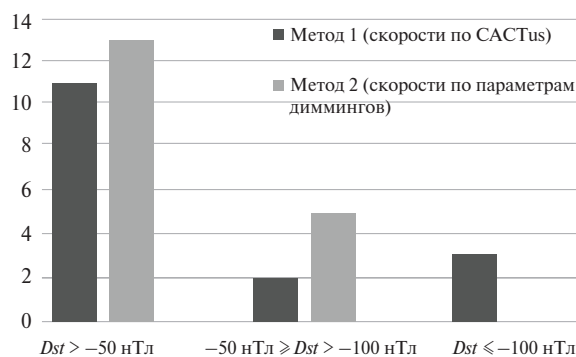


Рис. 3. Геомагнитные возмущения, вызванные спрогнозированными событиями, по оси Y отложено количество событий каждой группы. Dst — минимальный Dst -индекс, зафиксированный на орбите Земли по базе данных OMNI за период от начала наблюдения тела МКВМ (или ударной волны) до момента конца наблюдения МКВМ (либо в течение 20 ч после начала наблюдения).

Также были спрогнозированы события МКВМ из независимой выборки — димминги из центральной части Солнца, которым не были поставлены в соответствие КВМ по нашему алгоритму (282 димминга). Прогноз был выполнен для исследования возможности прогнозирования КВМ, не наблюдаемых в коронографе, которые могут иметь источники в центральной части солнечного диска. Соотнесение спрогнозированного события и события из каталога МКВМ производилось по времени прихода с точностью до 24 ч. Получено, что по методу 1 в этой выборке для 161 события (57%) не были спрогнозированы МКВМ, т.е. события false alarm; для 121 события (43%) были спрогнозированы МКВМ — события hit. Следует отметить, что 121 диммингу, для которых был сделан прогноз,

соответствует всего 59 МКВМ. Из них 37 диммингов — одиночные, то есть однозначно сопоставляются с МКВМ, остальные же 84 димминга соответствуют 22 МКВМ. Таким образом, в 63% случаев для МКВМ соответствие димминг — МКВМ однозначное, однако, более, чем в трети случаев (37%) одному МКВМ соответствует в среднем 2.4 димминга. В случаях множественных диммингов сложно определить, действительно ли процессы, связанные с диммингом из центральной части диска Солнца, являлись причиной МКВМ из каталога, особенно в максимуме солнечной активности при высокой частоте появления диммингов. Распределение МКВМ по количеству подходящих диммингов показывает, что хотя большая часть множественных событий (37 МКВМ) представляет собой ситуацию, в которой одному МКВМ соответствует два димминга, существуют случаи, когда одному спрогнозированному с точностью до 24 ч МКВМ можно поставить в соответствие 7, 8 и 10 диммингов, по параметрам которых был спрогнозирован МКВМ. Рассмотрим подробнее одно из таких событий.

В таблице 3 представлены данные восьми диммингов, по параметрам которым на основе DBM-модели был спрогнозирован один и тот же МКВМ. Рассматриваемый МКВМ был зарегистрирован у орбиты Земли 08.II.2014 в 01:00 и продлился до 12:00 9.II.2014, согласно каталогу Ричардсона и Кейн. МКВМ вызвал слабое геомагнитное возмущение. Средняя скорость солнечного ветра за этот период по данным базы OMNI составляла 421 км/с. По каталогу Ричардсона и Кейн данное событие было сопоставлено с КВМ, который произошел 4.II.2014 в 00:36. В базе данных SCASTus временем начала этого КВМ указано 4.II.2014 00:24. Этому КВМ не был поставлен в соответствие ни один димминг из

Таблица 3. Список диммингов, соотнесенных с межпланетным корональным выбросом массы, продлившимся на орбите Земли с 08.II.2014 до 9.II.2014

ID	T_{start} , дд.мм.гг. (чч.мм)	v_0 , км/с	w_{20} , км/с	T_{dbm} , дд.мм.гг. (чч.мм)	v_{dbm} , км/с	dT , ч	dV , км/с
6781	02.II.2014 (02:48)	259	300	08.II.2014 (11:55)	280	10.9	−141
6794	02.II.2014 (11:18)	438	300	07.II.2014 (02:01)	339	−23.0	−82
6813	02.II.2014 (22:00)	230	300	08.II.2014 (12:46)	503	11.8	82
6816	02.II.2014 (22:36)	327	300	08.II.2014 (07:05)	317	6.1	−104
6820	02.II.2014 (23:30)	290	300	08.II.2014 (12:25)	468	114	47
6842	04.II.2014 (04:24)	230	505	08.II.2014 (10:57)	523	10.0	102
6861	05.II.2014 (10:28)	413	600	08.II.2014 (22:51)	528	21.9	107
6864	05.II.2014 (12:56)	470	587	08.II.2014 (22:59)	526	22.0	105

Примечание. ID — идентификационный номер димминга в базе Solar Demon; T_{start} — дата и время начала димминга; v_0 — начальная скорость КВМ, рассчитанная по формуле (1); w_{20} — фоновая скорость солнечного ветра на расстоянии 20 радиусов Солнца в момент прихода КВМ на это расстояние; T_{dbm} , v_{dbm} — прогнозируемые время и скорость КВМ на орбите Земли; dT и dV — ошибки прогноза, рассчитанные по формулам (2), (3).

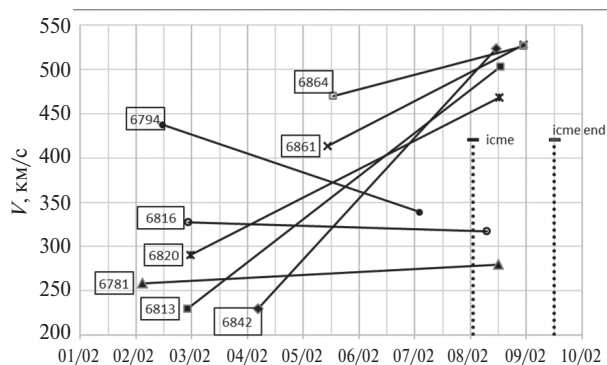


Рис. 4. Скорости КВМ, смоделированные по зарегистрированным в феврале 2014 г. диммингам, прогнозирующих МКВМ 8.И.2014 (01:00). Маркерами указаны начальные скорости выбросов (рассчитанные по формуле (1)) и скорости, полученные после моделирования прихода выбросов к Земле по DBM-модели с учетом меняющегося фонового ветра. В рамках указаны ID диммингов из базы Solar Demon, пунктирными вертикальными линиями отмечены моменты начала и конца МКВМ. По оси Y указана скорость в км/с, по оси X — дни в феврале 2014 г.

базы Solar Demon из-за отсутствия регистраций диммингов в течении двух часов, предшествующих КВМ, что является необходимым критерием установления соответствия.

Разброс по времени начала появления димминга на Солнце по данным базы Solar Demon между самым ранним и самым поздним диммингом, в этом случае, составил более 82 ч. Прогнозирование одного и того же МКВМ по параметрам диммингов, наблюдаемых в различное время, можно объяснить тем, что скорости КВМ, рассчитанные по параметрам наблюдаемых ранее диммингов, составляли около 300 км/с при фоновой скорости 300 км/с, а скорости, полученные по наблюдаемым позже диммингам, имели значения около 520 км/с при фоновой скорости более 580 км/с. На рис. 4 можно увидеть динамику рассчитанных по параметрам димминга скоростей выбросов во времени для начальной и конечной точек моделирования каждого события. Изменение скоростей при моделировании связано с особенностями DBM-модели: скорость выброса стремиться к скорости фонового солнечного ветра, поэтому некоторые КВМ ускоряются, а некоторые замедляются. Изначальное отличие скоростей, а также их динамика во время моделирования приводит к тому, что порядок прихода событий отличается от изначального порядка, то есть в процессе распространения происходит взаимодействие выбросов между собой и с высокоскоростным потоком. Таким образом, высокоскоростной поток, наблюдавшийся во время распространения выбросов по данным диммингов с более поздним временем начала, и их изначально большая скорость

позволили им «догнать» более ранние выбросы и достигнуть орбиты Земли с разницей менее 12 ч. Поэтому эти несколько корональных источников можно отнести к одному МКВМ, так как наше условие сопоставления допускает ошибку прогноза до 24 ч. Наша модель не описывает КВМ — КВМ взаимодействие, однако представленный в статье предварительный расчет показывает неоднозначность установления связи коронального источника МКВМ с МКВМ, измеренным на околоземной орбите. Для установления однозначной связи нужны более детальные исследования и расчеты для каждого случая регистрации димминга. Это представляется затруднительным при использовании для прогнозирования МКВМ в режиме, близком к реальному времени, когда данные наблюдений должны поступать каждый час или раз в несколько часов. В случаях, где один МКВМ можно соотнести с 7 и с 10 диммингами, также имеет место взаимодействие более поздних диммингов с высокоскоростными потоками.

В настоящей работе проанализирован разброс по времени начала между самым ранним и самым поздним диммингом из базы Solar Demon в тех случаях, когда модель, используя параметры нескольких диммингов, прогнозирует один и тот же МКВМ с точностью до 24 ч. В среднем эта величина составляет 18.6 ч, и для 68% МКВМ, спрогнозированных более чем одним диммингом, не превышает 24 ч. События, для которых эта разница превышает 24 ч, в основном связаны с большим количеством подходящих для прогноза МКВМ диммингов (более четырех). Самый большой разброс диммингов во времени наблюдается для рассмотренного ранее события. Для события с максимальным количеством подходящих диммингов (10), эта величина составляет 24.07 ч.

Таким образом, при описанном подходе в режиме реального времени применение диммингов из базы данных Solar Demon в некоторых случаях можно использовать для расчета начальных скоростей КВМ перед использованием скоростей с коронографа. При прогнозе по методу 2 меньшие ошибки получаются в тех случаях, когда КВМ изначально имеет меньшую скорость, а для высокоскоростных событий лучше работает прогноз по методу 1. Среди событий hit прогноза по независимым диммингам 23 МКВМ не были спрогнозированы ранее по алгоритму моделирования с использованием данных о скоростях КВМ при наблюдении в коронографе [28]. Среди них есть МКВМ, вызвавшие средние (4 события) и сильные (2 события) геомагнитные возмущения. В 19 из 23 случаев МКВМ были спрогнозированы по одиночным диммингам. Не спрогнозированные ранее МКВМ распределены по количеству при- близительно равномерно в 2011–2016 гг. Среди 23 МКВМ нет ни одного случая, когда КВМ не был

бы зарегистрирован в CACTus — эти события не были спрогнозированы, так как не прошли фильтры (КВМ имел слишком маленький угловой рас-твор, либо соответствующий ему димминг наблюдался на лимбе). Таким образом, метод 2 может помочь в тех случаях, когда КВМ плохо различимы в коронографе. Однако в максимуме солнечной активности возрастает количество наблюдаемых диммингов, и не все из них могут быть связаны с МКВМ, пришедшими к Земле.

Использование диммингов является важным элементом прогнозирования КВМ. Димминги могут быть использованы для отбора КВМ, которые потенциально могут достичь околоземной орбиты. Кроме того, в некоторых случаях (23 МКВМ) они помогают прогнозировать МКВМ, которые система, построенная на данных КВМ, спрогнозировать не смогла.

ВЫВОДЫ

1. Входные данные модели прихода МКВМ к Земле дополнены параметрами диммингов, что позволяет сделать прогноз и в случае невозможности подобрать по времени и местоположению КВМ для димминга, наблюдаемого в центральной области диска Солнца.

2. На основе данных солнечных наблюдений телескопом *SDO/AIA* и коронографом *SOHO/LASCO* за 2010–2018 гг. выделено 41 событие, в которых удалось установить связь между КВМ и диммингом.

3. Получено эмпирическое соотношение (1), позволяющее рассчитать скорость КВМ по максимальному скачку яркости димминга (для диммингов, расположенных от -10° до 10° долготы, от -15° до 15° широты и связанных с КВМ).

4. В целях прогноза прибытия МКВМ на орбиту Земли проведено моделирование скорости МКВМ двумя способами: с использованием параметров КВМ из системы автоматического детектирования CACTus, а также с использованием параметров димминга. Из 11 событий, в которых время прихода МКВМ было предсказано с точностью до 24 ч (события типа hit), 6 событий были предсказаны лучше с использованием данных о диммингах, 5 событий — с использованием скорости КВМ с коронографа.

5. Соотношение (1), использующее изменения параметров диммингов, позволяет лучше прогнозировать МКВМ, приводящие к слабым геомагнитным возмущениям.

6. Проведено моделирование МКВМ для диммингов, изначально не соотнесенных с КВМ. Получено, что с точностью до 24 ч МКВМ прогнозируются в 43% случаев. Треть событий оказалась связана с множественными событиями, когда одному МКВМ соответствует несколько диммингов. Особенно часто

это происходит в максимуме солнечного цикла при условии, что часть событий распространяется по медленному солнечному ветру, а часть по высокоскоростному. Также на это влияет разброс рассчитанных по параметру димминга скоростей КВМ.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность коллективам проектов *SDO/AIA*, *SOHO/LASCO*, а также составителям каталогов Solar Demon и CACTus (SIDC, Royal Observatory of Belgium, Brussels), OMNI (Goddard Space Flight Center, NASA), Richardson & Cane ICME List за предоставление доступа к данным.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 22–62–00048.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zhang J., Richardson I.G., Webb D.F. et al. Solar and interplanetary sources of major geomagnetic storms ($Dst \leq -100$ nT) during 1996–2005 // J. Geophysical Research: Space Physics. 2007. V. 112. Iss. A10.
2. Ермолаев Ю.И., Николаева Н.С., Лодкина И.Г. и др. Относительная частота появления и геоэффективность крупномасштабных типов солнечного ветра // Косм. исслед. 2010. Т. 48. № 1. С. 3–32.
3. Vršnak B., Žic T., Falkenberg T.V. et al. The role of aerodynamic drag in propagation of interplanetary coronal mass ejections // Astronomy & Astrophysics. 2010. V. 512. Iss. A43.
4. Verbeke C., Mays M.L., Temmer M. et al. Benchmarking CME arrival time and impact: progress on metadata, metrics and events // Space Weather. 2019. V. 17. Iss. 1. P. 6–26. <https://doi.org/10.1029/2018SW002046>
5. Taktakishvili A., Kuznetsova M., MacNeice P. et al. Validation of the coronal mass ejection prediction at the Earth orbit estimated by ENLIL heliosphere cone model // Space Weather. 2009. V. 7. Iss. 3.
6. Pomoell J., Poedts S. EUHFORIA: European heliospheric forecasting information asset. // J. Space Weather Space Clim. 2018. V. 8. Iss. A35. <https://doi.org/10.1051/swsc/2018020>
7. Zhao X.P., Plunkett S.P., Liu W. Determination of geometrical and kinematical properties of halo coronal

- mass ejections using the cone model // *J. Geophysical Research: Space Physics*. 2002. V. 107. Iss. A8. Art. ID. SSH 13–1-SSH 13–9.
8. Verbeke C., Pomoell J., Poedts S. The evolution of coronal mass ejections in the inner heliosphere: implementing the spheromak model with EUHFORIA // *Astronomy & Astrophysics*. 2019. V. 627. Iss. A111. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201834702>
 9. Paouris E., Mavromichalaki H. Effective acceleration model for the arrival time of interplanetary shocks driven by coronal mass ejections // *Solar Physics*. 2017. V. 292. Iss. A180. <https://doi.org/10.1007/s11207-017-1212-2>
 10. Núñez M., Nieves-Chinchilla T., Pulkkinen A. Prediction of shock arrival times from CME and flare data // *Space Weather*. 2016. V. 14. Iss. 8. P. 544–562. <https://doi.org/10.1002/2016SW001361>
 11. Vršnak B., Žic T., Vrbanc D. et al. Propagation of interplanetary coronal mass ejections: the drag-based model // *Solar Physics*. 2013. V. 285. Iss. 1–2. P. 295–315. <https://doi.org/10.1007/s11207-012-0035-4>
 12. Riley P., Mays M.L., Andries J. et al. Forecasting the arrival time of coronal mass ejections: analysis of the CCMC CME Scoreboard // *Space Weather*. 2018. V. 16. Iss. 9. P. 1245–1260. <https://doi.org/10.1029/2018SW001962>
 13. Kaiser M.L., Kucera T.A., Davila J.M. et al. The STEREO mission: an introduction // *Space Science Reviews*. 2008. V. 136. P. 5–16.
 14. Vourlidas A. Mission to the Sun – Earth L_5 Lagrangian point: an optimal platform for space weather research // *Space Weather*. 2015. V. 13. Iss. 4. P. 197–201. <https://doi.org/10.1002/2015SW001173>
 15. Paouris E., Vourlidas A., Papaioannou A. et al. Assessing the projection correction of coronal mass ejection speeds on time-of-arrival prediction performance using the effective acceleration model // *Space Weather*. 2020. V. 19. Iss. 2. Art. ID. e2020SW002617. <https://doi.org/10.1029/2020SW002617>
 16. Черток И.М., Гречнев В.В. Крупномасштабные «димминги», вызываемые корональными выбросами массы на Солнце, по данным SOHO/EIT в четырех линиях крайнего УФ-диапазона // *Астрон. журн.* 2003. Т. 80. № 11. С. 1013–1025.
 17. Harra L.K., Sterling A.C. Material outflows from coronal intensity «dimming regions» during coronal mass ejection onset // *Astrophys. J. Lett.* 2001. V. 561. P. L215–L218.
 18. López F.M., Cremades H., Balmaceda L.A. et al. Estimating the mass of CMEs from the analysis of EUV dimmings // *Astronomy & Astrophysics*. 2019. V. 627. Iss. A8. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201834163>
 19. Dissauer K., Veronig A.M., Temmer M. et al. Statistics of coronal dimmings associated with coronal mass ejections. I. Characteristic dimming properties and flare association // *Astrophys. J.* 2018. V. 863. Iss. 2. P. 169–188. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aad3c6>
 20. Dissauer K., Veronig A.M., Temmer M. et al. Statistics of coronal dimmings associated with coronal mass ejections. II. Relationship between coronal dimmings and their associated CMEs // *Astrophys. J.* 2019. V. 874. Iss. 2. P. 123–137. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab0962>
 21. Chikunova G., Dissauer K., Podladchikova T. et al. Coronal dimmings associated with coronal mass ejections on the solar limb // *Astrophys. J.* 2020. V. 896. Iss. 1. P. 17–33. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab9105>
 22. Chikunova G., Podladchikova T., Dissauer K. et al. Three-dimensional relation between coronal dimming, filament eruption, and CME // *Astronomy & Astrophysics*. 2023. V. 678. Iss. A166. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202347011>
 23. Nitta N.V., Mulligan T., Kilpua E.K.J. et al. Understanding the origins of problem geomagnetic storms associated with “stealth” coronal mass ejections // *Space Science Reviews*. 2021. V. 217. Iss. A82. <https://doi.org/10.1007/s11214-021-00857-0>
 24. Lamy P.L., Floyd O., Boclet B. et al. Coronal mass ejections over solar cycles 23 and 24 // *Space Science Reviews*. 2019. V. 215. Iss. A39. <https://doi.org/10.1007/s11214-019-0605-y>
 25. Вахрушева А.А., Шугай Ю.С., Канорцева К.Б. и др. Параметры корональных диммингов и их вариации в течение 24-го солнечного цикла // *Геомагнетизм и аэрономия*. 2024. Т. 64. № 1.
 26. Robbrecht E., Berghmans D. Automated recognition of coronal mass ejections (CMEs) in near-real-time data // *Astronomy & Astrophysics*. 2004. V. 425. Iss. 3. P. 1097–1106.
 27. Kraaikamp E., Verbeeck C. Solar Demon – an approach to detecting flares, dimmings, and EUV waves on SDO/AIA images // *J. Space Weather Space Clim.* 2015. V. 5. Iss. A18. <https://doi.org/10.1051/swsc/2015019>
 28. Shugay Y., Kalegaev V., Kaportseva K. et al. Modeling of solar wind disturbances associated with coronal mass ejections and verification of the forecast results // *Universe*. 2022. V. 8. P. 565–585. <https://doi.org/10.3390/universe8110565>

29. *Vršnak B., Temmer M., Žic T. et al.* Heliospheric propagation of coronal mass ejections: comparison of numerical WSA-ENLIL+Cone model and analytical Drag-based model // *Astrophys. J. Suppl. Series*. 2014. V. 213. Iss. 2. P. 21–29.
<https://doi.org/10.1088/0067-0049/213/2/21>
30. *Dumbović M., Čalogović J., Martinić K. et al.* Drag-based model (DBM) tools for forecast of coronal mass ejection arrival time and speed // *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*. 2021. V. 8. Art. ID. A639986.
<https://doi.org/10.3389/fspas.2021.639986>
31. *Шугай Ю.С., Канорцева К.Б.* Прогноз квазистационарных и транзитных потоков солнечного ветра по данным наблюдений солнца в 2010 г. // *Геомагнетизм и аэрономия*. 2021. Т. 61. № 2. С. 148–159.
<https://doi.org/10.31857/S0016794021020164>
32. *Wold A.M., Mays M.L., Taktakishvili A. et al.* Verification of real-time WSA-ENLIL+Cone simulations of CME arrival-time at the CCMC from 2010 to 2016 // *J. Space Weather Space Clim.* 2018. V. 8. Iss. A17.
<https://doi.org/10.1051/swsc/2018005>