Секция А. Астрофизика и физика Солнца. БШФФ-2026. С. 37–40.

УДК 523.9
DOI: 10.62955/0135-3748-2026-37
ORCID 0009-0004-0965-0058

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ КОРОНАЛЬНОГО ВЫБРОСА МАССЫ 15.02.2011 С УЧЁТОМ ЕГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С КОРОНАЛЬНОЙ ДЫРОЙ НА НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ

А.А. Вахрушева[1, 2], Ю.С. Шугай[1], К.Б. Капорцева[1, 2], В.В. Калегаев[1, 2]

[1]Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия, vakhr.anna@gmail.com
[2]Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

MODELING THE PROPAGATION OF THE 2011 FEBRUARY 15 CORONAL MASS EJECTION, TAKING ACCOUNT OF ITS INTERACTION WITH A CORONAL HOLE AT THE INITIAL STAGE

A.A. Vakhrusheva[1, 2], Yu.S. Shugay[1], K.B. Kaportseva[1,2], V.V. Kalegaev[1,2]

[1]Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, vakhr.anna@gmail.com
[2]Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Аннотация. Взаимодействуя с окружающим солнечным ветром, корональные выбросы массы (КВМ) могут ускоряться, замедляться, менять направление движения, а также менять форму и магнитную структуру. Отклонение КВМ от радиального распространения, а также изменение фронта могут происходить не только по пути его распространения в гелиосфере, но и вблизи Солнца, если источник КВМ находился недалеко от корональной дыры. В работе рассмотрено взаимодействие КВМ с потоком из корональной дыры на примере КВМ, наблюдавшегося коронографом 15 февраля 2011 г. Использованы данные с космических аппаратов SDO, SOHO, STEREO. Численное моделирование проведено с использованием Drag-Based Model.

Ключевые слова: корональные выбросы массы, солнечный ветер, взаимодействие потоков солнечного ветра, корональные дыры, высокоскоростные потоки.

Abstract. Interacting with the surrounding solar wind, coronal mass ejections (CMEs) can accelerate, decelerate, change their propagation direction, and also change their shape and magnetic structure. CME can deflect from radial propagation and deform not only along its path through the heliosphere but also near the Sun, if the coronal source of CME was located close to a coronal hole. In this paper, we examine the interaction of a coronal mass ejection with the solar wind stream from a coronal hole, using CME observed by coronagraphs on February 15, 2011 as an example. Data from the SDO, SOHO and STEREO spacecraft were used. Numerical simulations were performed using the Drag-Based Model.

Keywords: coronal mass ejections, solar wind, solar wind interaction, coronal holes, high-speed streams.

ВВЕДЕНИЕ

Корональные выбросы массы (КВМ) — выбросы плазмы с Солнца в межпланетное пространство, являющиеся проявлениями солнечной активности и одним из источников геомагнитных возмущений. Самые мощные магнитные бури вызваны взаимодействующими потоками солнечного ветра: взаимодействием КВМ с высокоскоростными потоками (ВСП) солнечного ветра из корональных дыр, а также взаимодействием нескольких КВМ. Взаимодействие КВМ и ВСП может уменьшить время пути КВМ на 10 ч, а также значительно повлиять на скорости и магнитное поле выброса [Kay et al., 2022]. Можно выделить следующие варианты взаимодействия КВМ с корональными дырами:

- Отклонения и искажения КВМ на начальных этапах. Они вызваны магнитным взаимодействием: корональные дыры действуют как магнитные препятствия, заставляя КВМ отодвигаться [Sahade et al., 2020]. Большая часть отклонений происходит на начальных этапах взаимодействия, 60 % геометрических искажений происходит на расстоянии до 30 радиусов Солнца [Isavnin et al., 2014]. Большинство КВМ распространяются не радиально, а под углом [Jain et al., 2025].
- Взаимодействие с ВСП в гелиосфере. Может произойти замедление, ускорение, изменение магнитной структуры, деформирование и отклонение КВМ. Можно выделить два основных сценария: либо ВСП следует за КВМ, КВМ сжимается, повышается скорость, плотность и B_z, либо КВМ следует за ВСП, скорость КВМ приближается к скорости ВСП. [Kay et al., 2023]

Для определения влияния корональной дыры на распространяющийся в короне КВМ в работе [Gopalswamy et al., 2012] был предложен параметр CHIP (Coronal Hole Influence Parameter). Считается, что сила, воздействующая на КВМ, источник которого находится вблизи корональной дыры, действует в направлении из геометрического центра корональной дыры. Амплитуда этой силы f зависит от площади корональной дыры A, среднего магнитного поля внутри корональной дыры на уровне фотосферы $\langle B \rangle$ и расстояния от корональной дыры до области эрупции d:

$$f = \frac{\langle B \rangle A}{d^2}.$$

Цель данной работы — исследование распространения КВМ, наблюдавшегося 15.02.2011, и влияния наблюдавшейся в это время на диске Солнца корональной дыры на время прибытия КВМ к Земле.

АНАЛИЗ СОБЫТИЯ

Коронографом 15.02.2011 в 02:24 UT наблюдался КВМ со скоростью 669 км/с и большим угловым раствором (гало). КВМ ассоциировался со вспышкой X2.2 из активной области (АО) 11158 (координаты АО S20W10). На рис. 1, *а* видно, что в юго-западной части изображения фронт искажен. На изменение фронта КВМ повлияло наличие на диске Солнца корональной дыры. Искажение фронта в нижней части КВМ также наблюдается на изображении STEREO-A (рис. 1, *б*), который в этот момент находился практически в квадратуре с Землей и наблюдал КВМ в боковой проекции.

Для определения влияния корональной дыры на отклонение КВМ на начальном этапе было рассчитано значение параметра CHIP. Для данного события сила взаимодействия $f = 0.12$ Гс — это значение ниже средних [Mohamed et al., 2012], что может говорить о низкой вероятности отклонения КВМ в нижней короне. Магнитная конфигурация АО (рис. 1, *в*) позволяет предположить, что произошло пересоединение магнитных линий АО и корональной дыры, из-за чего часть вещества покинула тело КВМ. Это объясняет форму КВМ, видимую на изображениях LASCO и STEREO.

В работе Jain et al., 2025 рассчитаны углы отклонения КВМ от радиального направления по данным системы DIRECD и модели Graduated Cylindrical Shell (GCS). По данным DIRECD с использованием данных о корональных диммингах (т. е. анализируется явление в нижней короне Солнца), угол отклонения составляет всего 1°. По данным моделирования GCS угол отклонения составляет 12.1°. Это позволяет предположить, что отклонение, если и было, то произошло на более поздних этапах выброса.

В данных OMNI наблюдается прибытие межпланетного КВМ (МКВМ) (рис. 2). Он прибывает к Земле между двумя высокоскоростными потоками. По данным каталога Ричардсона и Кейн, МКВМ был зарегистрирован 18.02.2011 в 19:00 с ударной волной 18.02.2011 в 01:30 и длился до 08:00 20.02.2011. Средняя скорость составила 470 км/с, *Dst* упал до –32 нТл, МКВМ не был классифицирован как магнитное облако. По данным каталога крупномасштабных типов солнечного ветра ИКИ РАН, было зарегистрировано магнитное облако с областью сжатия.

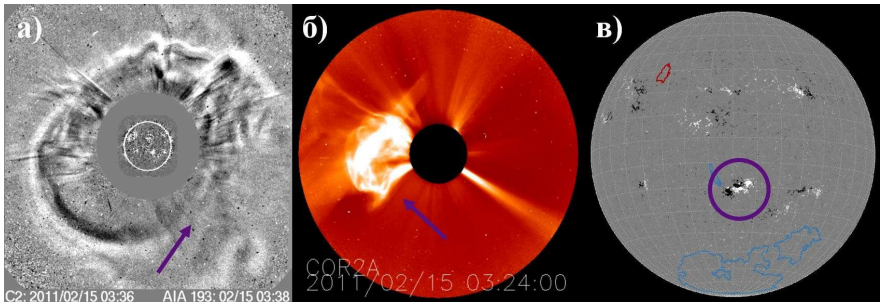

Рис. 1. Корональный выброс массы 15.02.2011: *а* — изображение КВМ коронографа LASCO; *б* — изображение КВМ коронографа COR2 STEREO-A; *в* — активная область (выделена окружностью) и корональная дыра на магнитограмме HMI. Стрелками обозначена искаженная часть фронта КВМ. На магнитограмме голубой цвет — положительная полярность

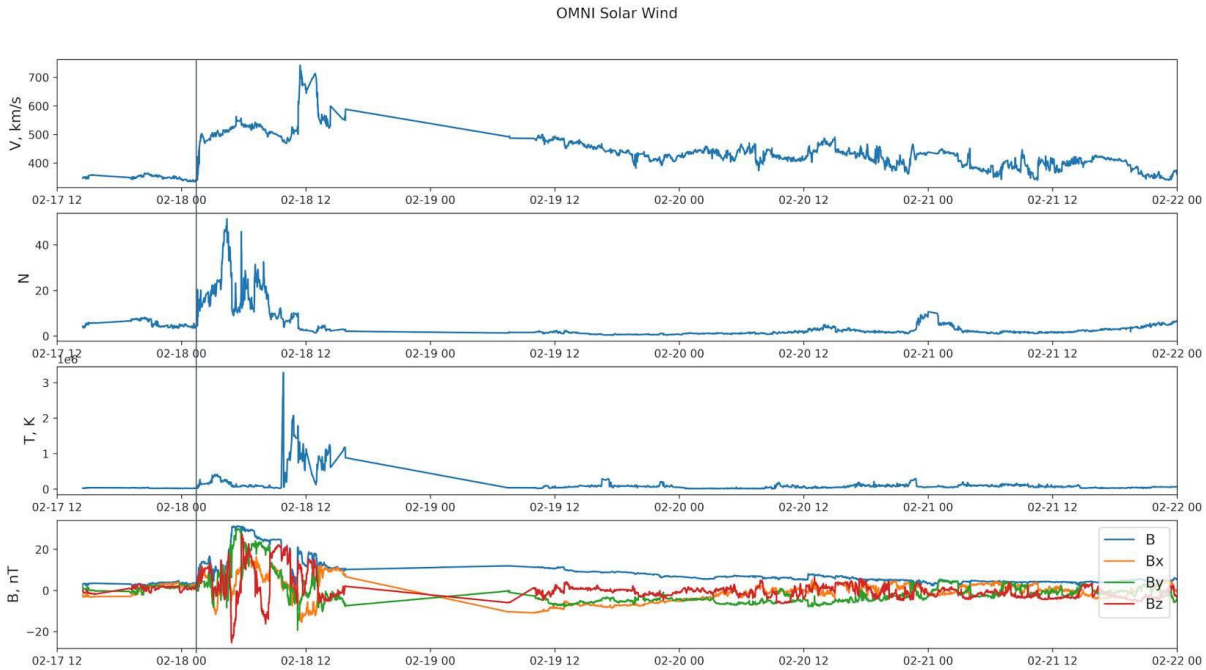

Рис. 2. Параметры плазмы солнечного ветра с 12:00 17.02.2011 до 00:00 22.02.2011 по данным OMNI. Вертикальная черта — прибытие ударной волны

МОДЕЛИРОВАНИЕ

Для моделирования была использована модель аэродинамического сопротивления Drag-Based Model (DBM). Она основывается на предположении о том, что начиная с определенного расстояния от Солнца можно пренебречь силой Лоренца и гравитационной силой, т. е. на распространение КВМ влияет только сила магнитогидродинамического взаимодействия КВМ с окружающим солнечным ветром. Наблюдения показывают, что скорость КВМ v при его распространении в гелиосфере приближается к скорости окружающего солнечного ветра w: медленные КВМ ускоряются, быстрые замедляются. Движение КВМ в DBM описывается следующими уравнениями и зависит от параметра сопротивления γ [Vršnak et al., 2013]:

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

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

Для моделирования прибытия КВМ к Земле используется проекция модели конуса на плоскость эклиптики. Рассматривается три двумерных варианта геометрии КВМ: концентрическая модель — рассчитывается для всех точек фронта КВМ в предположении о том, что они находятся на одном расстоянии от Солнца; самоподобная модель — форма КВМ остается постоянной; модель с выравниванием фронта — форма фронта КВМ уплощается по ходу движения [Dumbović et al., 2021].

МКВМ прибыл к Земле между двумя высокоскоростными потоками солнечного ветра, и ВСП плоскости эклиптики непосредственно перед прибытием выброса не наблюдалось. Поэтому для моделирования была выбрана скорость окружающего солнечного ветра w=350 км/с. В ходе моделирования двумерной моделью аэродинамического сопротивления получены времена и скорости прибытия КВМ к Земле, представленные в табл. 1, а также изображение фронта КВМ, показанное на рис. 3.

Лучшие результаты в данном случае дает самоподобная модель. Однако по всем вариантам модели КВМ опережает зарегистрированное время его прибытия к Земле. Это может быть связано с тем, что к Земле пришла искаженная часть КВМ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследовано распространение КВМ, наблюдавшегося 15.02.2011 и пришедшего к Земле 18.02.2011. Показано, что корональная дыра на диске Солнца могла повлиять на распространение КВМ на начальном этапе. На изображениях с коронографа видно искажение фронта КВМ в южной его части. К Земле пришел фланг КВМ, а не центральная его область. Этот факт объясняет результаты моделирования: рассчитанное время прибытия КВМ к Земле по Drag-Based Model опережает время регистрации МКВМ в каталогах.

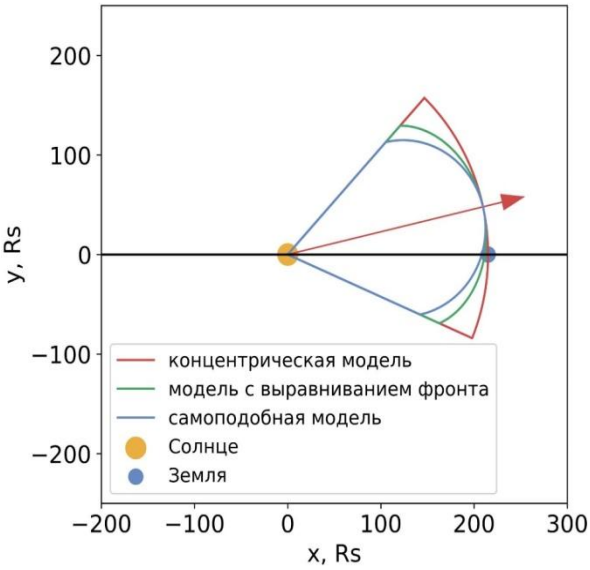

Рис. 3. Визуализация распространения фронта КВМ в момент его прибытия к Земле, полученная с помощью двумерной Drag-Based Model. Стрелкой обозначено направление распространения КВМ

Таблица 1. Результаты моделирования КВМ 15.02.2011 с использованием двумерной Drag-Based Model

	Концентрическая модель	Модель с выравниванием фронта	Самоподобная модель
T	2011-02-18 06:25	2011-02-18 07:26	2011-02-18 08:27
v	408 км/с	406 км/с	397 км/с

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Dumbović M., Calogović J., Martinic K., Vršnak B., Sudar D., Temmer M., Veronig A. Drag-Based Model (DBM) tools for forecast of coronal mass ejection arrival time and speed // Front. Astron. Space Sci. 2021. V. 8, №. 639986.

Gopalswamy N., Mäkela P., Xie H., Akiyama S., Yashiro S. CME interactions with coronal holes and their interplanetary consequences // J. Geophys. Res.: Space Phys. 2009. V. 114. N A3.

Isavnin A., Vourlidas A., Kilpua E. Three-dimensional evolution of flux-rope CMEs and its relation to the local orientation of the heliospheric current sheet // Solar Phys. 2014. V. 289. № e2023SW003443. P. 2141–2156.

Jain S., Podladchikova T., Dissauer K., Veronig A.M., Razquin A. Validation DIRECD: Statistical evaluation of coronal mass ejection direction estimates from coronal dimmings // Astrophys. J.: Suppl. Ser. 2025. V. 281. 14.

Kay C., Nieves-Chinchilla T., Hofmeister S., Palmerio E. Beyond basic drag in interplanetary CME modeling: effects of solar wind pileup and high-speed streams // Space Weather. 2022. V. 20. № 9.

Kay C., Nieves-Chinchilla T., Hofmeister S., Palmerio E. An efficient, time-dependent high speed stream model and application to solar wind forecasts // Space Weather. 2023. V. 21. № e2023SW003443.

Mohamed A.A, Gopalswamy N., Yashiro S., Akiyama S., Mäkela P., Xie H., Jung H. The relation between coronal holes and coronal mass ejections during the rise, maximum and declining phases of Solar Cycle 23 // J. Geophys. Res.: Space Phys. 2012. V. 117. N A1.

Sahade A., Cecere M., Krause G. Influence of coronal holes on CME deflections: numerical study. // Astrophys. J. 2020. V. 896.

Vršnak B., Zic T., Vrbaneć D., Temmer M., Rollett T., Möstl C., et al. Propagation of interplanetary coronal mass ejections: The Drag-Based Model // Solar Phys. 2013. V. 285. P. 295–315.