

## **РАСПРОСТРАНЕНИЕ И ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КОРОНАЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ МАСС**

**Якунина Г.В.**

*МГУ им. М.В. Ломоносова, Государственный астрономический институт  
им. П.К. Штернберга, Москва, Россия*

## **PROPAGATION AND INTERACTION OF CORONAL MASS EJECTIONS**

**Yakunina G.V.**

*Lomonosov Moscow State University, Sternberg State Astronomical Institute, Moscow, Russia*

*Coronal mass ejections (CMEs) on the Sun interact with various structures. The interaction between CMEs and magnetic fields in the corona and interplanetary space, as well as the solar wind, determines the propagation and evolution of the CME itself. This article briefly presents the results of observations of CME-CME interactions. The duration of the collision may exceed 10 hours. CME-CME interactions may result in changes in the speed and direction of CME propagation. Observational and numerical studies have shown that the kinematic characteristics of two or more CMEs may change significantly after a CME interaction.*

**<https://doi.org/10.31725/0552-5829-2024-359-362>**

Корональные выбросы массы (КВМ) играют ключевую роль в определении космической погоды. КВМ это мощные выбросы плазмы и магнитных полей из солнечной атмосферы. КВМ достигают максимальной скорости (до 3000 км/с) в среднем за ~54 мин. В зависимости от начальной скорости время движения от Солнца до Земли составляет от 1 до 4 дней. Более подробно о характеристиках КВМ см [1].

Выбросы сохраняют свою магнитную конфигурацию или топрологию, распространяются через гелиосферу на большие расстояния, взаимодействуют с солнечным ветром, воздействуя на планеты на своем пути. Аналог КВМ в гелиосфере называется межпланетным КВМ (МКВМ). Взаимосвязь между свойствами КВМ в короне и их межпланетными аналогами изучена недостаточно хорошо. До недавнего времени между этими двумя областями существовал большой пространственный разрыв, который мешал понять пространственную и временную эволюцию КВМ. Медленные КВМ могут распространяться через гелиосферу с отклонением в 2–30° как в широтном, так и в азимутальном направлении. Более быстрые КВМ имеют тенденцию распространяться радиально.

Помимо морфологического расширения КВМ демонстрируют отклонение или не радиальное движение, а также вращение, приводящее к изменению угла наклона КВМ. Оба отклонения создают проблему для прогнозирования попаданий или промахов КВМ, направленных на Землю, и, в конечном итоге, будет ли данный КВМ геоэффективным. Отклонение имеет

тенденцию изменять направление движения КВМ от высоких широт к экватору во время солнечного минимума. Во время солнечного максимума направления отклонения могут быть сложными, как в сторону более высоких, так и в сторону более низких широт от исходного позиционного угла КВМ.

Корональный выброс 7.01.2014 г., связанный со вспышкой X1,2 ( $V \sim 2500$  км/с), возник вблизи центра диска. Была предсказана сильная магнитная буря, но КВМ был отклонен к западу примерно на  $37^\circ$  по долготе. Центры прогнозирования космической погоды ошиблись в предсказании магнитной бури. КВМ почти полностью прошел мимо Земли [2].

Эволюция КВМ зависит от их начальной скорости во внешней короне относительно скорости окружающего солнечного ветра: более быстрые КВМ замедляются, в то время как более медленные КВМ ускоряются. По мере того, как КВМ распространяются дальше в межпланетное пространство, их скорости имеют тенденцию выравниваться со скоростью солнечного ветра.

Возможности наблюдения и изучения КВМ возросли в течение 24-го солнечного цикла, благодаря большому набору чувствительных приборов на борту космических аппаратов и наземным обсерваториям. Это дает уникальную возможность изучать КВМ с нескольких точек обзора и на разных радиальных расстояниях. Запуск с 2018 по 2020 г., трех космических аппаратов для исследования внутренней гелиосферы (VerniColombo, Parker Solar Probe и Solar Orbiter) открыл новые возможности в исследовании гелиосферы и ее сложной динамики.

Общая частота КВМ увеличилась в 24-м солнечном цикле по сравнению с 23-м циклом, хотя частота быстрых и широких КВМ снизилась. Количество интенсивных геомагнитных бурь в 24-м цикле снизилось. В 23-м цикле произошло 86 интенсивных геомагнитных бурь, в 24-м цикле всего 22 [3]. Были проведены сравнения КВМ типа гало, которые возникали вблизи лимба во время 23 и 24 циклов, наблюдалось 44 и 38 гало соответственно [4].

В работе [5] была оценена интенсивность 25-ого цикла по отношению к 23-му и 24-му циклам на основе интенсивности выбросов корональной массы типа гало. Гало КВМ схожи в 24 и 25 циклах, но отличаются от гало КВМ 23 цикла. Более слабые циклы имеют низкое давление в гелиосфере, что позволяет КВМ расширяться сильнее и, следовательно, повышает вероятность образования гало. Изменение свойств гало КВМ в солнечном цикле согласуется с методами прогнозирования циклов. 25 цикл аналогичен 24 циклу и немного сильнее его. Число КВМ гало не уменьшилось в 24 и 25 циклах, хотя число пятен (SSN) значительно уменьшилось. КВМ расширяются сильнее в 24 и 25 циклах, чем в 23, это приводит к большему количеству гало КВМ в 24 и 25 циклах [5].

Взаимодействия между последовательными КВМ могут привести к экстремальной буре в межпланетном пространстве. Это указывает на решающее значение взаимодействий КВМ–КВМ как для фундаментальной физики плазмы, так и для космической погоды. Процесс столкновения КВМ довольно сложен. В работе [6] сообщается о первом обнаружении на длинных радиоволнах взаимодействия между КВМ в межпланетной среде. Серия снимков SOHO/LASCO была получена 10.06.2000 г. Два КВМ1 ( $V = 1095$  км/с) и КВМ2 ( $V = 1780$  км/с) были связаны со вспышкой M5.2. Быстрый КВМ2 догоняет медленный КВМ1. Наблюдаемое усиление радиоизлучения – следствие ударной волны. Ударная волна, идущая впереди быстрого КВМ2, проходит через ядро КВМ1. В результате взаимодействия ядро медленного КВМ1 значительно изменило свою траекторию, см. рис. 2 [6]. Основываясь на характеристиках радиовсплеска, была оценена плотность ядра  $\sim 4 \cdot 10^4$  см<sup>-3</sup>.

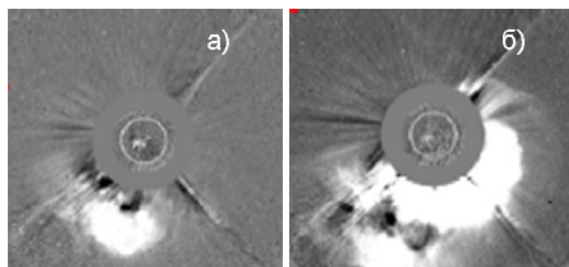
Непрерывные наблюдения КВМ в течение более чем двух солнечных циклов до сегодняшнего дня проводилось на LASCO/SOHO. Однако наблюдения LASCO страдали от эффектов проекции и ограниченного поля зрения (в пределах  $30 R_{\odot}$  Солнца). В 2006 г. космические аппараты STEREO стали проводить наблюдения с нескольких точек, что позволило оценить влияние проекции на характеристики КВМ [7]. С запуском STEREO стали чаще наблюдать взаимодействия КВМ в межпланетном пространстве. Это стимулировало наблюдательные и численные исследования в этой области. Было обнаружено, что взаимодействие КВМ-КВМ может привести к изменениям скорости и направления распространения КВМ. Взаимодействие КВМ-КВМ всегда связано со сложными явлениями, включая магнитное пересоединение, обмен импульсами, передачу энергии, изменения в расширении КВМ.

Выбросы корональной массы на Солнце взаимодействуют с магнитными полями в короне и межпланетном пространстве, а также солнечным ветром, управляют распространением и эволюцией самого КВМ. Структуры, возникающие в результате взаимодействия КВМ–КВМ, были подробно обсуждены в обзоре [8].

Сильнейшая магнитная буря в 23 цикле произошла 20.11.2003 г. ( $Dst = -472$  нТл,  $K_p = 9$ ). В АО 10501 18.11.2003 г. наблюдались 3 вспышки, выбросы волокон и два КВМ. На рисунке приведены изображения двух взаимодействующих КВМ. В результате взаимодействия КВМ в межпланетном пространстве, область взаимодействия сжалась, южный компонент межпланетного магнитного поля увеличился. Магнитное облако положительной helicity было зафиксировано КА ACE 20 ноября. Это облако плазмы образовалось в результате выброса правостороннего волокна.

Взаимодействие КВМ–КВМ может привести к изменениям скорости и направления распространения КВМ. Наблюдательные и численные исследования показали, что кинематические характеристики двух или более

КВМ могут значительно измениться после взаимодействия КВМ. Сжатие одного КВМ другим и распространение ударной волны внутри магнитного выброса могут приводить к длительному периоду усиления магнитного поля в южном направлении, что может вызывать интенсивные геомагнитные бури [9]. Интенсивность направленного на юг магнитного поля, связанного с направленными на Землю корональными выбросами массы, имеет решающее значение для определения масштабов последующих геомагнитных бурь [10].



**Рисунок.** КВМ 20.11.2003 г.

- а) КВМ 08:06 UT,  $V \sim 1223$  км/с, ширина  $104^\circ$ ;  
б) КВМ 08:50 UT,  $V \sim 1660$  км/с, гало.

Столкновения КВМ оказывают влияние на космическую погоду. Понимание характеристик распространения КВМ от Солнца к Земле является ключом к оценке их геоэффективного поведения. Чтобы лучше понять сложности, связанные с взаимодействующими КВМ, необходимы новые модели и новые данные наблюдений. Наблюдения КВМ и их взаимодействия на разных гелиоцентрических расстояниях от Солнца с помощью миссий Parker Solar Probe и Solar Orbiter может помочь в проверке моделей прогнозирования магнитного поля КВМ.

#### Литература

1. Zhang J., Temmer M., Nat Gopalswamy N. et al. // PEPS, 2021, **8**, 56.
2. Mays M.L., Thompson B.J., Jian L.K. et al. // ApJ, 2015, **812**, 145.
3. Gómez J., Podladchikova T., Veronig A. et al. // ApJ, 2020, **899**:47 (14 pp).
4. Gopalswamy N., Akiyama S., and Yashiro S. // ApJL, 2020, **897**, L1, (7 pp).
5. Gopalswamy N., Michalek G., Seiji Yashiro S. et al. // 2024 arXiv240704548.
6. Gopalswamy N., Yashiro S., Kaiser M. et al. // ApJL, 2001, **548**, 91.
7. Mishra W., Teriaca L. // J Astrophysics, 2023, **44**, 20.
8. Lugaz N., Temmer M., Wang Y. et al. // Solar Phys, 2017, **292**, 64.
9. Farrugia C.J., Jordanova V.K., Thomsen M.F. et al. // JGR, 2006, **111**, A11104.
10. Koya S., Patsourakos S., Georgoulis M.K. et al. // A&A, 2024, **690**, A233.