

ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ СКОРОСТИ КВМ И СВЯЗАННОЙ С НИМ УДАРНОЙ ВОЛНЫ

Я.И. Егоров, В.Г. Файнштейн

Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия,
egorov@iszf.irk.ru

VELOCITY OSCILLATIONS OF CME AND RELATED SHOCK

Ya.I. Egorov, V.G. Fainshtein

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia, egorov@iszf.irk.ru

Аннотация. В ряде работ сделан вывод, что скорость корональных выбросов массы (КВМ) меняется со временем не монотонно, а совершает колебания. В отличие от предшествующих исследований колебаний скорости КВМ при его распространении в поле зрения коронографа, мы для относительно быстрых КВМ рассмотрели отдельно колебания скорости самого КВМ (т.е. тела КВМ) и скорости связанной с КВМ ударной волны. Оказалось, что характеристики колебаний двух структур заметно различаются.

Ключевые слова: Солнце, КВМ, ударная волна

Abstract. Several researchers have concluded that the velocity of coronal mass ejections (CME) has oscillations. Unlike the previous studies, we examined the velocity oscillations of a CME (i.e., its body) separately from the velocity of the CME-related shock, for relatively fast CMEs. The characteristics of the two structures have been found to differ noticeably.

Keywords: Sun, CME, shock wave

ВВЕДЕНИЕ

Корональные выбросы массы (КВМ) — магнитно-плазменные структуры, регулярно выбрасываемые из солнечной атмосферы в межпланетное пространство, выносят туда заметное количество энергии, массы и магнитного потока [Webb and Howard, 2012; Gopalswamy и др., 2016]. Множество сведений, касающихся свойств КВМ было получено с использованием Large Angle and Spectrometric Coronagraph [LASCO; Brueckner и др. 1995] на борту миссии Solar and Heliospheric Observatory [Domingo и др. 1995]. Характеристики КВМ, зарегистрированных LASCO, представлены в различных каталогах (см., например, SOHO LASCO CME CATALOG — CDAW DATA CENTER (nasa.gov) и SOHO/LASCO HALO CME Catalog (nasa.gov)). Отмеченные каталоги описаны в работах [Gopalswamy и др. 2009; Gopalswamy и др. 2010].

Самые быстрые КВМ оказываются связанными в короне с ударными волнами (УВ) [Vourlidas and Ontiveros, 2009; Vemporad and Mancuso 2010; Fainshtein and Egorov, 2019]. Кинематические характеристики таких УВ заметно отличаются от аналогичных характеристик тела КВМ [Fainshtein и др., 2018]. В цитируемой работе были получены отдельно зависимости от времени скорости тела КВМ и УВ для разных групп КВМ. При этом временные профили скорости двух структур сглаживались путем усреднения имеющихся возмущений.

Несколько исследований показали, что скорость КВМ по мере его удаления от Солнца меняется со временем не монотонно, а совершает квазипериодические колебания [Krahl и др., 2001; Shanmugaraju и др., 2010; Lee и др., 2015, 2018; Michalek и др., 2016, 2022]. Для разных КВМ периоды колебаний скорости варьировались от 24 мин. до 824 мин., т.е. до более 10 часов. Амплитуда колебаний скорости по данным первых двух цитируемых работ составляла 157–418 км/с. Авторы работ [Lee и др., 2015, 2018] показали, что колебания скорости КВМ

существуют как в радиальном, так и в азимутальном направлениях. В работе [Michalek и др., 2022] были рассмотрены все КВМ, зарегистрированные в 23–24 циклах солнечной активности, для которых имелось не менее 11 измерений высота–время. Авторы этой статьи отметили, что главным фокусом их работы было показать, что колебания скорости КВМ — это реальное явление, в значительной степени связанное с изменением физических свойств КВМ, зарегистрированных во время различных фаз солнечной активности. В работах [Michalek и др., 2016, 2022] высказано предположение, что свойства колебаний скорости КВМ определяются магнитной структурой жгута. Авторы этих работ отмечают, что природа колебаний скорости может быть интерпретирована в терминах нормальных мод колебаний натянутой магнитной струны неоднородной плотности.

Выше уже отмечалось, что в короне впереди быстрых КВМ может быть ударная волна.

В данной работе для 9 событий мы сравнили колебания скорости отдельно тела КВМ и связанной с ним УВ. Анализировались скорости полных гало КВМ. Оказалось, что характеристики колебаний скорости двух структур заметно различаются.

ДАННЫЕ И МЕТОДЫ ИХ АНАЛИЗА

Анализировались колебания скорости КВМ, а также связанной с ним УВ, отобранных из каталога (https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/HALO/halo.htm) за период с 2010 г. по июль 2023 г. и удовлетворяющих следующим требованиям:

(1). Линейная проекционная скорость гало КВМ превышала 1000 км/с.

(2). Связанная с КВМ вспышка имела долготу не более 70° к востоку и к западу от центрального меридиана.

(3). В поле зрения коронографа LASCO C3 можно надежно выделить 11 положений границы тела КВМ и связанной УВ.

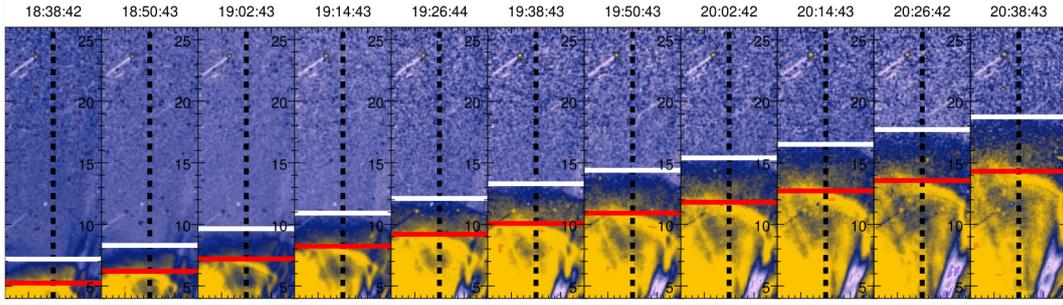


Рис. 1. Примеры нахождения границы тела КВМ и связанной ударной волны в выделенные моменты времени для события 2014-09-10. По горизонтальной и вертикальной оси на каждой последовательности изображений приведены расстояния в радиусах Солнца. Тело КВМ окрашено в желтый цвет, ударно-сжатая плазма за фронтом УВ окрашена в темно синий цвет. Граница тела КВМ показана горизонтальной линией красного цвета, УВ показана линией белого цвета

Заметим, что для событий с такими скоростями, впереди КВМ почти всегда оказывается УВ, скорость которой больше скорости тела КВМ [Fainshtein и др., 2018].

Ниже приведен список КВМ с указанием даты и (в скобках) времени первой регистрации КВМ в поле зрения коронографа LASC0 C2: 2011-03-21(02:24); 2011-10-01(20:48); 2013-05-17(09:12); 2014-06-10(13:30); 2014-09-10(18:00); 2014-12-13(14:24); 2015-06-18(17:24); 2016-01-01(23:24); 2017-07-23(04:48).

Для нахождения характеристик колебаний скорости тела КВМ и УВ мы использовали зависимость скорости каждой структуры от времени в виде соотношения (1) из работы [Michalek и др., 2016, 2022]:

$$V(t) = a_0 \sin \sin(a_1 t + a_2) + a_3 + a_4 t, \quad (1)$$

где a_0 — это амплитуда колебаний, a_1 — частота колебаний, a_2 — фаза, a_3 — начальная скорость, and a_4 — ускорение, t — время. Как и в работе [Michalek и др., 2022], в своей работе мы сосредоточимся на коэффициентах a_0 и a_1 . Все параметры $a_0 - a_4$ находились с использованием метода наименьших квадратов для полученных из наблюдений значений скорости КВМ и УВ: $V_{cme}(t)$ и $V_{sh}(t)$. При этом, как и в работе [Michalek и др., 2016, 2022], накладывалось ограничение на периоды рассмотренных колебаний тела КВМ и УВ: полагалось, что периоды колебаний скорости каждой структуры не менее 60 минут

$$V_m = \frac{R_{i+1} - R_i}{t_{i+1} - t_i}, \quad (2)$$

где V_m — скорость КВМ или связанной УВ, R_i — положение тела КВМ или УВ, измеренное в момент t_i .

В качестве границы тела КВМ рассматривалось начало резкого увеличения яркости. В качестве УВ, связанной с КВМ, рассматривалась граница разреженной области яркости впереди тела КВМ, по аналогии, например, с [Ontiveros and Vourlidas, 2009]. При нахождении оптимальных параметров мы полагали, как и в работе [Michalek и др., 2016, 2022], погрешность нахождения скорости равной 80 км/с.

Положения границы тела КВМ и связанной с ним УВ находились с использованием разностных изображений короны, когда из изображений короны в поле зрения коронографа LASC0 C3 в фиксированные моменты времени t вычитался фон — изображения короны, усредненные в течение нескольких часов до

момента первой регистрации КВМ коронографом LASC0 C3. Примеры нахождения положения границы тела КВМ и связанной ударной волны показаны на рис. 1 для события 2014-09-10 для всех рассмотренных моментов времени.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 2 показаны изменения со временем скоростей КВМ и УВ, определенных из наблюдений, в сравнении с зависимостью от времени скорости, найденной по формуле (1) с оптимальными параметрами (a_0, \dots, a_4).

Близость точек, характеризующих измеряемые значения скорости каждой анализируемой структуры, к зависимости скорости структуры, определяемой по формуле (1), свидетельствует о наличии колебаний скорости КВМ и УВ с одной стороны и о различии характера колебаний скорости КВМ и УВ с другой. Отсутствие для многих измерений скорости КВМ и УВ пересечений баров, характеризующих погрешность измерения скорости анализируемых структур, позволяет сделать вывод, что колебания скорости КВМ и УВ различаются.

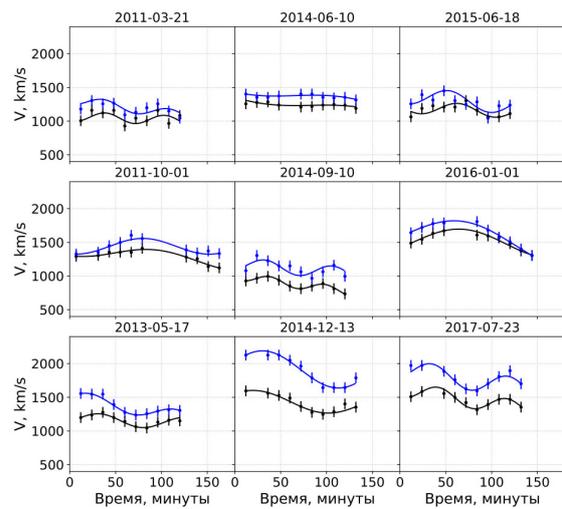


Рис. 2. Вариации со временем скорости тела КВМ (черные точки с барями, характеризующими погрешность измерения скорости) и УВ (синие точки с барями). Сплошными линиями показаны изменения скорости двух структур, рассчитанной по формуле (1) с оптимальными параметрами a_0, \dots, a_4

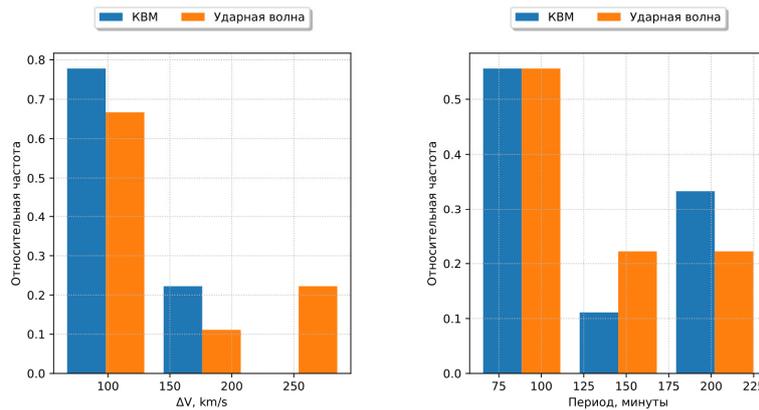


Рис. 3. Гистограммы распределений амплитуды колебаний скорости КВМ и УВ — левая панель, и периодов колебаний этих структур — правая панель.

На рис. 3 (левая панель) показаны гистограммы распределения доли событий по интервалам амплитуды колебаний для тела КВМ и для УВ (размер интервала приблизительно равен 45 км/с). Из этого рисунка следует, что амплитуды колебаний скорости КВМ в основном сосредоточены в области минимальных значений для КВМ и относительно равномерно уменьшается от промежуточных до маленьких значений для УВ. Средние значения амплитуды колебаний скорости оцениваются как 108 ± 44 км/с для КВМ и 145 ± 78 км/с для УВ.

На правой панели рис. 3 показаны гистограммы распределения количества событий по интервалам периодов колебаний для тела КВМ и для УВ (размер интервала приблизительно равен 33 мин). Видно, что, как для КВМ, так и для УВ в основном преобладают небольшие периоды колебаний скорости, а доля самых больших периодов больше для КВМ. Средние значения периода колебаний скорости оцениваются как 126 ± 65 мин для КВМ и 132 ± 65 мин для УВ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На примере 9 быстрых гало КВМ и связанных с ними УВ показано, что скорость движения каждой из этих структур совершает колебания. Мы исследовали свойства колебаний скорости отдельно для тела КВМ и УВ. Определены для каждого события 5 параметров колебаний в соответствии с уравнением (1). Нас прежде всего интересовали амплитуда и период колебаний скорости. Оказалось, что для всех рассмотренных случаев амплитуда и период колебаний скорости для УВ больше, чем для тела КВМ. Для большинства измеренных скоростей КВМ и УВ (V_{CME} и V_{SH}) разность $V_{SH} - V_{CME}$ превышает сумму погрешностей измерения скорости каждой структуры равной $2 \cdot 80$ км/с (рис. 2). Это свидетельствует о надежности сделанного вывода о различии характера колебаний тела КВМ и связанной с ним УВ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Bemporad A., Mancuso S. First Complete Determination of Plasma Physical Parameters Across a Coronal Mass Ejection-driven Shock // *Astrophysical J.* 2010. V. 720. 130.
 Brueckner G.E., Howard R.A., Koomen M.J., Korendyke

C.M. The large angle spectroscopic coronagraph (LASCO) // *Solar Phys.* 1995. 162. 357.

Domingo V., Fleck B., Poland A.I. The SOHO Mission: an Overview // *Solar Phys.* 1995. 162(1–2). 1.

Fainshtein V.G., Egorov Y.I. Onset of a CME-Related Shock Within the Large-Angle Spectrometric Coronagraph (LASCO) Field of View // *Solar Phys.* 2019. 294(9). 126.

Fainshtein V.G., Egorov Y.I., Zagainova Y.S. Kinematics of CMEs and related shocks from LASCO data: Comparative analysis // *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Phys.* 2018. V. 179. 538.

Gopalswamy N. History and development of coronal mass ejections as a key player in solar terrestrial relationship // *Geoscience Lett.* 2016. V. 3. 8.

Gopalswamy N., Yashiro S., Michalek G. et al. The SOHO/LASCO CME Catalog // *Earth Moon and Planets.* 2009. V. 104. 295.

Gopalswamy N., Yashiro S., Michalek G., Xie H. et al. A Catalog of Halo Coronal Mass Ejections from SOHO // *Sun and Geosphere.* 2010. V. 5. 7. ADS.

Krall J., Chen J., Duffin R.T. et al. Erupting Solar Magnetic Flux Ropes: Theory and Observation // *Astrophys. J.* 2010. V. 562 (2). 1045.

Lee H., Moon Y.-J., Nakariakov V.M. Radial and Azimuthal Oscillations of Halo Coronal Mass Ejections in the Sun // *Astrophys. J. Letters.* 2015. V. 803(1), L7.

Lee H., Moon Y.-J., Nakariakov V.M. et al. Three-dimensional Oscillations of 21 Halo Coronal Mass Ejections Using Multi-spacecraft Data // *Astrophys. J.* 2018. V. 868(1). 18.

Michalek G., Gopalswamy N., Yashiro S. Periodic Oscillations in LASCO Coronal Mass Ejection Speeds: Space Seismology // *Astrophys. J. Letters.* 2022. V. 927(1), L16.

Michalek G., Shanmugaraju A., Gopalswamy N. et al. Statistical Analysis of Periodic Oscillations in LASCO Coronal Mass Ejection Speeds // *Solar Phys.* 2016. V. 291(12), 3751.

Ontiveros V., Vourlidas A. Quantitative Measurements of Coronal Mass Ejection-Driven Shocks from LASCO Observations // *Astrophys. J.* 2009. V. 693. 267.

Shanmugaraju A. et al. Quasi-Periodic Oscillations in Lasco Coronal Mass Ejection Speeds // *Astrophysical J.* 2010. V. 708. 450.

Vourlidas A., Ontiveros V. A Review of Coronagraphic Observations of Shocks Driven by Coronal Mass Ejections. In: Ao, X., Burrows, G.Z.R. (eds.) American Institute of Physics Conference Series, American Institute of Physics Conference Series. 2009. 1183. 139.

Webb D.F., Howard T.A. Coronal Mass Ejections: Observations // *Living Reviews in Solar Physics.* 2012. V. 9. 3.