

ГЕНЕРАЦИЯ УДАРНОЙ ВОЛНЫ, СВЯЗАННОЙ С КВМ, В ПОЛЕ ЗРЕНИЯ КОРОНОГРАФА LASCO C3

Я.И. Егоров, В.Г. Файнштейн

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия
egorov@iszf.irk.ru

CME-RELATED SHOCK GENERATION WITHIN THE LASCO C3 CORONAGRAPH FIELD-OF-VIEW

Ya.I. Egorov, V.G. Fainshtein

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia

Аннотация. Показано, что ударная волна (УВ), связанная с корональным выбросом массы (КВМ), зарегистрированным 17.07.2012, возникает в поле зрения коронографа LASCO C3 на расстоянии, на котором продольная скорость тела КВМ превышает суммарную альфвеновскую скорость и скорость медленного солнечного ветра. Установлено, что возникшая УВ является бесстолкновительной. Сделан вывод, что сформировавшаяся УВ является головной по отношению к движущемуся со сверхальфвеновской скоростью телу КВМ. В то же время процесс формирования УВ включает укрупнение переднего фронта возмущенной области корональной плазмы, что характерно для поршневого УВ.

Ключевые слова: корона, КВМ, ударные волны.

Abstract. It was shown that July 17 2012 CME-related shock arises within the LASCO C3 field of view at the distances where CME velocity exceeds the total Alfvén speed and the speed of the slow solar wind. It is found that this is collisionless bow shock. At the same time, the process of shock generation includes the steepening of the leading edge of the perturbed region of the coronal plasma which is characteristic for a piston shock.

Keywords: corona, CME, shock waves.

Введение

Впереди многих КВМ в поле зрения коронографов LASCO C2 и/или C3 наблюдаются ударные волны (УВ) [Vourlidas, Ontiveros, 2009; Vourlidas, Vemporad, 2012]. В некоторых случаях эти УВ называют поршневыми ударными волнами [Chen, 2011]. В действительности, вопрос о том, какова природа каждой УВ, наблюдаемой коронографами LASCO, остается открытым, т.к. существует по крайней мере 3 (4) возможных механизма генерации таких УВ. УВ могут генерироваться непроницаемым поршнем, сжимающим при своем движении окружающую среду (поршневые УВ) [Седов, 1981; Зельдович, Райзер, 2008]. УВ может быть головной, возникающей при обтекании тела окружающим газом (плазмой) со сверхзвуковой (сверхальфвеновской) скоростью [Ландау, Лифшиц, 1988]. УВ может быть взрывной, возникающей вследствие резкого изменения параметров среды (температуры, давления и др.) в ограниченном объеме и последующего расширения этого объема [Седов, 1981; Зельдович, Райзер, 2008] или резкого воздействия на окружающие корональные структуры быстрого, движущегося с большим ускорением волокна (жгута) [Grechnev, Uralov, et al., 2016]. В последнем случае возникшая УВ после попадания в поле зрения LASCO может «присоединиться к телу КВМ» и далее эволюционировать с ним по общим законам.

В настоящей работе анализируется возникновение УВ, связанной с КВМ, в поле зрения LASCO C3, и выясняется, с каким из перечисленных выше механизмов может быть связано образование данной УВ. Выясняется также, определяют ли ширину

фронта возникшей УВ столкновения частиц плазмы между собой или УВ является бесстолкновительной.

Данные, методы их анализа и полученные результаты

Для анализа был выбран КВМ, возникший в АО NOAA 11521 и впервые зарегистрированный в поле зрения LASCO C2 17 июля 2012 (13:48:06), рис. 1. Этот выброс массы удовлетворял следующим условиям: КВМ возникает относительно высоко в нижней короне, его скорость медленно нарастает со временем (с расстоянием) на начальном этапе его движения. КВМ сопровождается рентгеновской вспышкой с GOES баллом M2.0.

Пространственный профиль продольной скорости тела КВМ $V_b(R)$ приблизительно вдоль оси выброса массы был сопоставлен с профилем суммы альфвеновской скорости $V_a(R)$ и скорости медленного солнечного ветра $V_{sw}(R)$, рис. 2. Профиль $V_b(R)+V_{sw}(R)$ представлен в виде полосы из-за большой погрешности нахождения $V_a(R)$ и $V_{sw}(R)$. Выбор в данном случае скорости именно медленного ветра на рис. 2 связан с тем, что значительная часть тела КВМ движется в медленном ветре. Этот вывод основан на том, что, в период наблюдения КВМ, над западным лимбом оказывается протяженный по широте участок нейтральной линии магнитного поля на поверхности источника в расчетах поля в потенциальном приближении [<http://wso.stanford.edu/synsourcel.html>], а значит пояса стримеров, в котором распространяется медленный ветер.

На рис. 3 показана подборка пространственных распределений яркости изображений короны, включа-

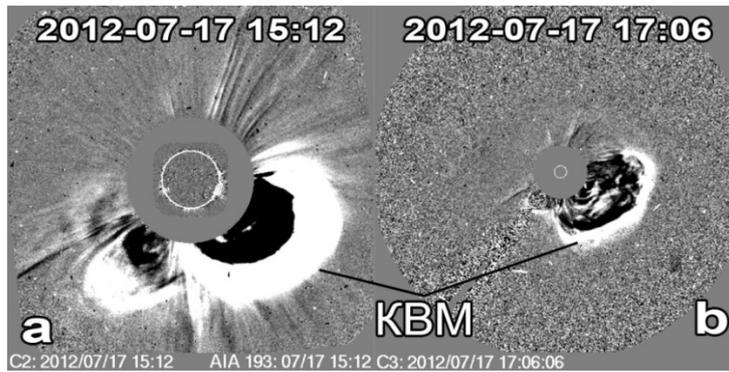


Рис. 1. Разностные изображения короны в поле зрения LASCO C2 (a) и LASCO C3 (b) по данным.

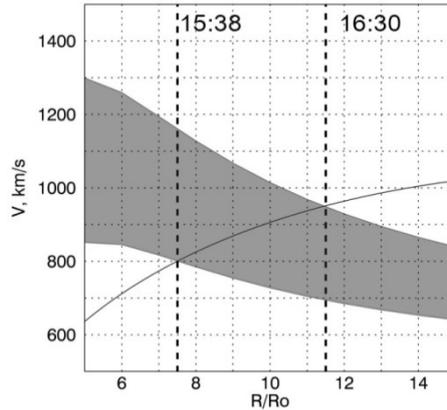


Рис. 2. Серая полоса — пространственный профиль $V_a(R)+V_{sw}(R)$. Здесь V_{sw} — скорость медленного ветра из работы [Sheeley, Jr., Wang, et al., 1997]. $V_{sw}^2(R) = 1.75 \cdot 10^5 [1 - \exp(-(R - 4.5) / 15.2)]$, (км/с)². Черная сплошная линия — зависимость от расстояния продольной скорости тела КВМ приблизительно вдоль его оси. По оси X отложено расстояние в радиусах Солнца из центра солнечного диска

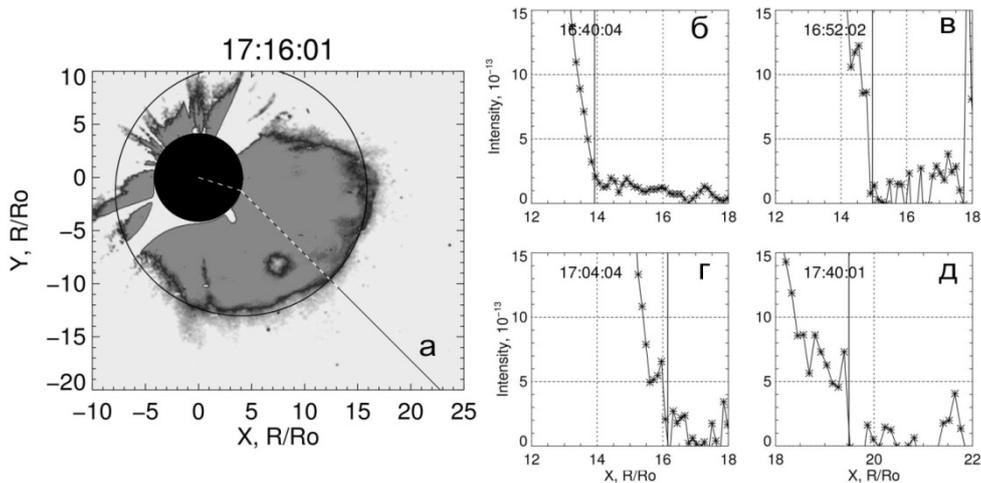


Рис. 3. Вспомогательная окружность черного цвета проведена приблизительно по границе тела КВМ (a). Из центра этой окружности в каждый момент времени проведены прямые, вдоль которых были получены распределения относительной яркости короны по данным LASCO C3 (б–д). Расстояние на каждой панели отсчитывается от центра вспомогательного диска плюс расстояние до центра солнечного диска. Вертикальными линиями указывается либо основание возмущенной области корональной плазмы впереди тела КВМ, либо возникшая УВ. На (б) показан момент до образования УВ. На (в–д) виден фронт сформировавшейся ударной волны.

ющих КВМ. Предварительная обработка изображений включала вычитание фона, полученного усреднением изображений Солнца за 2.5 часового промежутка времени до начала вспышки (этот промежуток характеризовался отсутствием активности в интересующем участке изображения). Также значения изображений ниже стандартного отклонения по фону

приравнивались к нулю. Для получения минимальной ширины фронта УВ усреднения изображений и распределений вдоль линии сканирования не использовались.

Из рис. 2 следует, что если условием генерации УВ является превышение скоростью тела КВМ скорости V_a+V_{sw} , то можно ожидать появление УВ

после 16:30 UT. Из рис. 3 следует, что в 16:40 фронт начинает укручиваться и уже в следующий момент времени мы видим образование УВ с резким фронтом, ширина которого не превышает пространственное разрешение коронографа LASCO C3, равного $0.125R_{\odot}$. После этого образовавшийся скачок яркости движется вперед без изменения ширины фронта. Мы считаем, что этот скачок яркости является бесстолкновительной ударной волной, т. к. ширина фронта этой УВ во много раз меньше средней длины свободного пробега заряженных частиц корональной плазмы.

Наш анализ показал, что движение наблюдаемого в канале SDO/AIA 193 Å жгута характеризуется маленькими скоростями и ускорениями. Это означает, что вероятность генерации УВ на этих высотах движущимся жгутом, согласно механизму, предложенному в работе [Grechnev et al., 2011], мала. В поле зрения LASCO C2 ядро КВМ, которое, как мы предполагаем, есть жгут, наблюдавшийся в канале 193 Å, может достигать скорости ≈ 1150 км/с и ускорения 0.96 км/с². В этом случае можно ожидать генерации УВ резким воздействием эруптивного ядра на вышестоящие магнитоплазменные структуры. Но генерации УВ таким способом не было обнаружено.

Наиболее вероятным механизмом генерации УВ в данном случае мы рассматриваем образование головной УВ при обтекании тела КВМ окружающей плазмой, движущейся со сверхальфвеновской скоростью относительно медленного солнечного ветра. В поддержку этого предположения свидетельствует увеличение расстояния между УВ и телом КВМ примерно в 2 раза в течение времени наблюдения УВ, сопровождающее возрастание поперечного размера тела КВМ со временем. Головная УВ располагается тем дальше от обтекаемого газом (плазмой) тела, чем больше радиус граничной поверхности тела на его оси. Было обнаружено, что со временем (с расстоянием) скорость УВ V_{sh} возрастает быстрее, чем скорость тела КВМ V_b . На больших расстояниях разность $V_{sh}-V_b$ превышает 250 км/с. Мы оценили скорость поступательного движения тела КВМ. Для этого измерили максимальную скорость расширения КВМ в поперечном направлении в зависимости от расстояния и вычли эту скорость из скорости тела КВМ в продольном направлении. Полученная скорость поступательного движения тела КВМ $\approx (130-230)$ км/с и нигде не превышает сумму скоростей V_a+V_{sh} . Это означает, что если УВ возникает вследствие обтекания тела КВМ окружающей плазмой со сверхальфвеновской скоростью относительно солнечного ветра, то, в отличие от обтекания газом твердого тела, здесь обтекание КВМ окружающей плазмой возникает вследствие как поступательного движения, так и расширения тела КВМ.

Мы оценили величину альфвеновского числа Маха $M_a=(V_{sh}-V_{sw})/V_a$ для УВ после ее возникновения. Установлено, что величина M_a растет на начальном этапе движения от значения $M_a=1.2$ до $M_a=1.95$, а затем несколько уменьшается и далее слабо меняется.

Заключение

Показано, что в рассмотренном событии 17.07.2012 г. УВ, связанная с КВМ, формируется в поле зрения коронографа LASCO C3 на расстоянии, превышающем расстояние, на котором продольная скорость тела КВМ превышает сумму альфвеновской скорости и скорости медленного солнечного ветра. Это позволяет предположить, что данная УВ является головной, возникающей при обтекании тела КВМ окружающей корональной плазмой со «сверхальфвеновской» скоростью относительно солнечного ветра. Это предположение поддерживает наблюдаемое возрастание расстояния между УВ и телом КВМ со временем по мере увеличения размеров тела КВМ. При этом возникновению УВ предшествует укручение со временем переднего фронта возмущенной области корональной плазмы перед телом КВМ. Окончательно сформировавшаяся УВ является бесстолкновительной.

Установлено, что направленная скорость тела КВМ и скорость связанной УВ растут с расстоянием, но скорость УВ возрастает быстрее, чем скорость тела КВМ. Скорость поступательного движения тела КВМ на всех расстояниях оказывается меньше максимальной скорости расширения тела КВМ в поперечном направлении. Показано, что среднее значение альфвеновского числа Маха на нескольких расстояниях ≈ 1.5 , максимальное значение ≈ 2 .

Авторы благодарят команду LASCO за возможность свободного использования данных, а Уралова А.М. и Гречнева В.В. за полезные обсуждения и методическую помощь.

Список литературы

- Vourlidas A., Ontiveros V. A review of coronagraphic observations of shocks driven by coronal mass ejections // Proc. AIP 2009. V. 1183. P. 139.
- Vourlidas A., Vemporad A. A decade of coronagraphic and spectroscopic studies of CME-driven shocks // American Institute of Physics Conference Series. 2012. V. 1436. P. 279–284. DOI: 10.1063/1.4723620. 1207.1603.
- Chen P.F. Coronal mass ejections: models and their observational basis // Living Rev. in Solar Phys. 2011. V. 8. P. 1.
- Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. М: Наука, 1981.
- Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Физматлит, 2008.
- Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. М.: Наука, 1988.
- Grechnev V.V., Uralov A.M., Kochanov A.A., et al. A tiny eruptive filament as a flux-rope progenitor and driver of a large-scale CME and wave // Solar Phys. 2016. V. 291. P. 1173.
- Sheeley N.R., Jr., Wang Y.-M., et al. Measurements of flow speeds in the corona between 2 and 30 R_{\odot} // Astrophys. J. 1997. V. 484, iss. 1, pp. 472–478.
- Grechnev et al., 2011.
<http://wso.stanford.edu/synsourcel.html>