

УДК 523.98

Формирование и начальная стадия движения КВМ, связанных с эрупцией протуберанцев, и природа сопровождающих их ударных волн

В.Г. Файнштейн¹, Я.И. Егоров¹, Р.Т. Сотникова²

¹ ИСЗФ СО РАН, ул. Лермонтова, 126-а, а/я 291, г. Иркутск, 664033
vfain@iszf.irk.ru

² ИГУ, бул. Гагарина, 20, г. Иркутск, 664003

Поступила в редакцию 25 октября 2013 г.

Аннотация. Ранее Файнштейн, Егоров (2013) выявили по данным космических аппаратов SDO, PROBA2 и др. процессы, сопровождающие возникновение 6 лимбовых КВМ, а также изучили закономерности их движения на начальном этапе. Появлению рассмотренных КВМ предшествовала эрупция протуберанца или горячей эмиссионной петли, и все они были связаны с рентгеновскими вспышками. Последующее изучение КВМ, связанных с эрупцией протуберанца, показало, что формирование таких выбросов массы и начальная фаза их движения могут характеризоваться индивидуальными особенностями. В данной работе приводятся примеры КВМ с такими особенностями. Обнаружена положительная корреляция между высотой эруптивного протуберанца, связанного с КВМ, и высотой фронтальной структуры КВМ, измеренными перед началами их движений. Для двух КВМ по данным SDO показано, что кинематика тела КВМ и связанной ударной волны существенно различаются. Установлено, что зависимость положения и скорости ударной волны от времени, полученные по данным SDO, согласуются с теоретическими зависимостями изменения со временем этих параметров движения в рамках автомоделного движения взрывной ударной волны. Сделан вывод, что обнаруженные ударные волны не являются поршневыми с телом КВМ в качестве поршня.

FORMATION AND INITIAL PHASE OF CME MOTION ASSOCIATED WITH PROMINENCE ERUPTION AND NATURE OF THEIR RELATED SHOCK WAVES, *by V.G. Fainshtein, Ya.I. Egorov, R.T. Sotnikova.* Using data from SDO, PROBA2 and other spacecrafts, Fainshtein, Egorov (2013) have discovered processes accompanying formation of six limb CMEs and studied regularities of their motion during the initial phase. The considered CMEs occurred after the prominence eruption or hot emission loop, and all of them were associated with X-ray flares. The follow-up study of the CMEs associated with the prominence eruption showed that the formation of such mass ejections and the initial phase of their motion may be characterized by special features. In this work, we give examples of CMEs with such features. We have revealed a positive correlation between the height of the CME-associated eruptive prominence and height of the frontal structure of CMEs measured before they began to move. Analyzing two of the CMEs, using SDO data, we found out that kinematics of the CME body and its related shock wave differs considerably. We have established that the time dependence of shock wave position and velocity obtained from SDO data is in agreement with theoretical dependences of time variation of these motion parameters in the context of self-similar motion of an explosion shock wave. We have concluded that the shock waves are not piston-like ones with the CME body acting as a piston.

Ключевые слова: Солнце, корональные выбросы массы, эруптивные протуберанцы, ударные волны

1 Введение

Использование данных с высоким временным и пространственным разрешением позволяет выявить важные детали формирования корональных выбросов массы (КВМ). В работе (Файнштейн, Загайнова, 2012) с использованием данных GOES/SXI, SOHO/EIT и TRACE показано, что быстрые импульсные КВМ, связанные с мощными вспышками, но не связанные с эруптивными волокнами, возникают в результате нарушения равновесия отдельных магнитоплазменных жгутов или нескольких жгутов (возможно, аркады петель), существующих в течение нескольких часов до начала эрупции. В этой работе также впервые показано как формируется КВМ с широкой фронтальной структурой из нескольких эруптирующих петель в результате, вероятно, множественных магнитных пересоединений между отдельными петлями. В работе (Файнштейн, Егоров, 2013) по данным SDO и других космических аппаратов изучено возникновение 6 лимбовых КВМ, связанных с эрупцией протуберанца или горячей эмиссионной петли, наблюдаемой в линиях крайнего ультрафиолета. Типичный процесс формирования рассмотренных КВМ выглядит следующим образом. Эруптивный протуберанец (эруптивная эмиссионная петля) возмущает вышележащие области короны. В результате этого над эруптивным протуберанцем возникают движущиеся с разной скоростью структуры повышенной яркости, и одновременно выше выделяются несколько участков повышенной яркости, где в дальнейшем сформируется фронтальная структура КВМ. Эти участки в течение некоторого времени могут быть практически неподвижными, либо двигаться со скоростью, меньшей, чем скорость нижележащих структур. Фронтальная структура КВМ окончательно формируется и начинает быстро двигаться в направлении от лимба после соприкосновения с местом ее формирования движущихся внутренних структур. Патсоуракос и др. (2013) изучили формирование одного КВМ по данным многоволновых наблюдений Солнца космическим аппаратом SDO. Примерно за 7 часов до появления выброса массы возникает магнитоплазменный жгут, наблюдаемый первоначально в самых “горячих” линиях (131 Å) и сопровождающийся ограниченной вспышкой. Далее жгут охлаждается и затем, вследствие дестабилизации, происходит его выброс, сопровождающийся эруптивной вспышкой. Так возникает довольно быстрый (1000 км/с) КВМ.

Важным при исследовании механизмов генерации КВМ является выяснение связи выбросов массы с другими сопровождающими их видами солнечной активности. Показано, что максимум скорости КВМ коррелирует с полной энергией ускоренных во вспышке электронов (Беркебайл-Стойзер и др., 2012). Установлено, что возрастание скорости многих КВМ со временем синхронизовано с поведением интенсивности мягкого рентгеновского излучения $I_{SXR}(t)$ из области связанной вспышки (Галлахер и др., 2003; Жанг и др., 2001; Жанг, Дерс, 2006; Марисич и др., 2007; Патсоуракос и др., 2010; Файнштейн, Егоров, 2013). Бейн и др. (2012) показали, что КВМ, связанные со вспышками, характеризуются в среднем большими максимумами ускорения и меньшими длительностями ускорения. В работе (Бак-Степличка и др., 2013) показано, что существует сильная корреляция между параметрами вспышек с большой длительностью фазы нарастания $I_{SXR}(t)$ (“медленные” вспышки) с характеристиками КВМ. В работах (Теммер и др., 2008, 2010) сделан вывод, что временной профиль основного ускорения $a(t)$ КВМ синхронизован с профилем интенсивности жесткого рентгеновского излучения $I_{HXR}(t)$ из связанной вспышки. Необходимым этапом на пути выяснения физических механизмов генерации КВМ является исследование кинематики и других свойств выбросов массы на начальной стадии их движения.

С использованием данных различных инструментов были получены временные профили скорости, ускорения и геометрических характеристик КВМ сразу после их возникновения (Жанг и др., 2001; Галлахер и др., 2003; Жанг и Дерс, 2006; Вршнак и др., 2007; Теммер и др., 2008, 2010; Марисич и др., 2009; Патсоуракос и др., 2010, 2013; Бейн и др., 2011; Файнштейн и Егоров, 2013).

В данной работе обсуждаются два вопроса. Во-первых, приводятся примеры КВМ, связанных с эрупцией протуберанца, формирование которых характеризуется различными особенностями. Во-вторых, анализируется кинематика ударных волн, связанных с КВМ, которым предшествует эрупция протуберанца, с целью выяснения природы этих ударных волн.

2 Данные и методы исследования

Мы покажем особенности формирования 3 КВМ, связанных с эрупцией протуберанца: 07.06.2011, 29.06.2011 и 08.03.2011, а также приведем результаты исследования кинематики двух ударных волн, связанных с КВМ 13.06.2010 и 07.06.2011. Результаты получены с использованием многоволновых (длина волны солнечного излучения 304 Å, 171 Å, 193 Å, 211 Å, 131 Å) данных инструментов AIA на борту космического аппарата SDO, телескопа PROBA2/SWAP, а также коронографов MarkIV в Мауна Лоа Solar Observatory (MLSO) и SOHO/LASCO C2, C3. Сведения об эруптивных волокнах (протуберанцах) из ближайшей окрестности места генерации КВМ черпались из данных телескопов, наблюдающих Солнце в линии H α (http://swrl.njit.edu/ghn_web), (http://mlso.hao.ucar.edu/mlso_data_CORONADO_2010.html) и др., а также по изображениям Солнца в линии 304 Å. Для выделения КВМ по данным SDO/AIA для каждого пикселя формировались разностные изображения с помощью соотношения: $\Delta I = (I_2 \times T_{exp2}/T_{exp0} - I_1 \times T_{exp1}/T_{exp0})/I_0$. Здесь I_2 – яркость изображения в более поздний момент времени, I_1 – в один из предшествующих моментов времени, I_0 – в третий, еще более ранний момент времени: здесь учитывалось, что времена экспозиции T_{exp1} , T_{exp2} и T_{exp0} при получении трех изображений могут различаться. Для выделения КВМ, по данным SWAP, MarkIV и LASCO, использовалась лишь разность $\delta I = I_2 - I_1$. Для изучения движения КВМ на расстояниях $R > 2R_o$ (R отсчитывается в плоскости неба от центра солнечного диска, R_o – радиус Солнца) использовались данные коронографов LASCO, установленных на борту космического аппарата SOHO. Для получения сведений о характеристиках излучения в мягком рентгеновском диапазоне использовались данные космического аппарата GOES (<http://goes.ngdc.noaa.gov/data>). Скорость КВМ V_i находилась с помощью формулы $V_i = (L_{i+1}^F - L_i^F)/(t_{i+1} - t_i)$, где L_i^F – расстояние фронта КВМ от выбранной точки на видимом диске Солнца, в общем случае вдоль криволинейной траектории в момент времени t_i . При этом полагалось, что значение скорости V_i достигается в момент $t_{i+1}^F = (t_{i+1} + t_i)/2$. Полученные значения $V_i(t)$ аппроксимировались би-сплайнами (B-splines) с учетом погрешности определения $V_i(t)$ в каждый момент времени. В результате получалась гладкая функция $V(t)$. Ускорение КВМ находилось из соотношения: $a(t) = dV(t)/dt$. Если положение фронта КВМ определялось на изображениях Солнца визуально, то погрешность нахождения скорости рассчитывалась как среднеквадратичное отклонение измеренной скорости фронта КВМ от среднего значения при N -измерениях ($N = 5 - 10$). В поле зрения LASCO при $R > 5R_o$ мы полагали, что положение фронта КВМ определяется с точностью $0.5R_o$ (Шанмурадджу и др., 2010).

3 Результаты

3.1 Особенности формирование КВМ, связанных с эрупцией протуберанца

Событие 7 июня 2011 г. Это событие уже обсуждалось в работе (Файнштейн, Егоров, 2013). Здесь мы его приводим, чтобы показать все обнаруженные особенности формирования КВМ, связанных с эрупцией протуберанца. На рис. 1 показан процесс формирования КВМ.

Формирование КВМ начинается с эрупции протуберанца – триггера создания этого КВМ. Этот протуберанец был зарегистрирован как в линии H α , так и в нескольких линиях крайнего ультрафиолета. Медленное движение эруптивного протуберанца (ЭП) начинается до начала связанной с КВМ вспышки. Эруптивный протуберанец возмущает находящиеся выше участки короны, и это возмущение проявляется в виде последовательности движущихся друг за другом петлеобразных структур (отмечены стрелками с номером 2). При этом структуры, начавшие двигаться позднее, достигают больших скоростей, чем структуры, начавшие свое движение раньше. В результате возникшие позднее структуры догоняют структуры, появившиеся раньше. Все эти внутренние движущиеся структуры, в конце концов, догоняют самую медленную внешнюю структуру под номером 3 и вместе с ней формируют фронтальную структуру КВМ. С этого момента КВМ можно считать сформировавшимся. Такая картина наблюдается и в линиях 193 Å и 211 Å. Кинематика различных структур в процессе формирования КВМ и сформировавшегося выброса массы показана на рис. 2. Видно, что движение КВМ начинается после начала связанной вспышки.

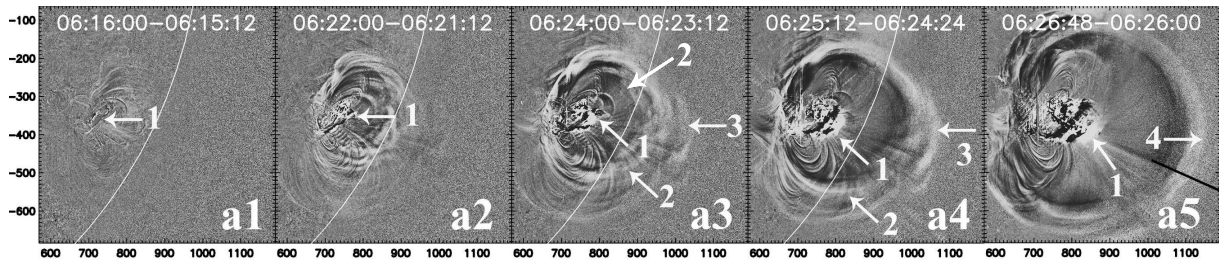


Рис. 1. Последовательность разностных изображений участка Солнца по наблюдениям инструментом SDO/AIA в линии 171 Å. Стрелкой с номером 1 отмечен эруптивный протуберанец, стрелками с номером 2 – внутренние структуры. Стрелкой с номером 3 отмечена внешняя структура, которая, в конце концов, станет частью фронтальной структуры КВМ. И, наконец, стрелкой с номером 4 обозначена сформировавшаяся фронтальная структура выброса массы

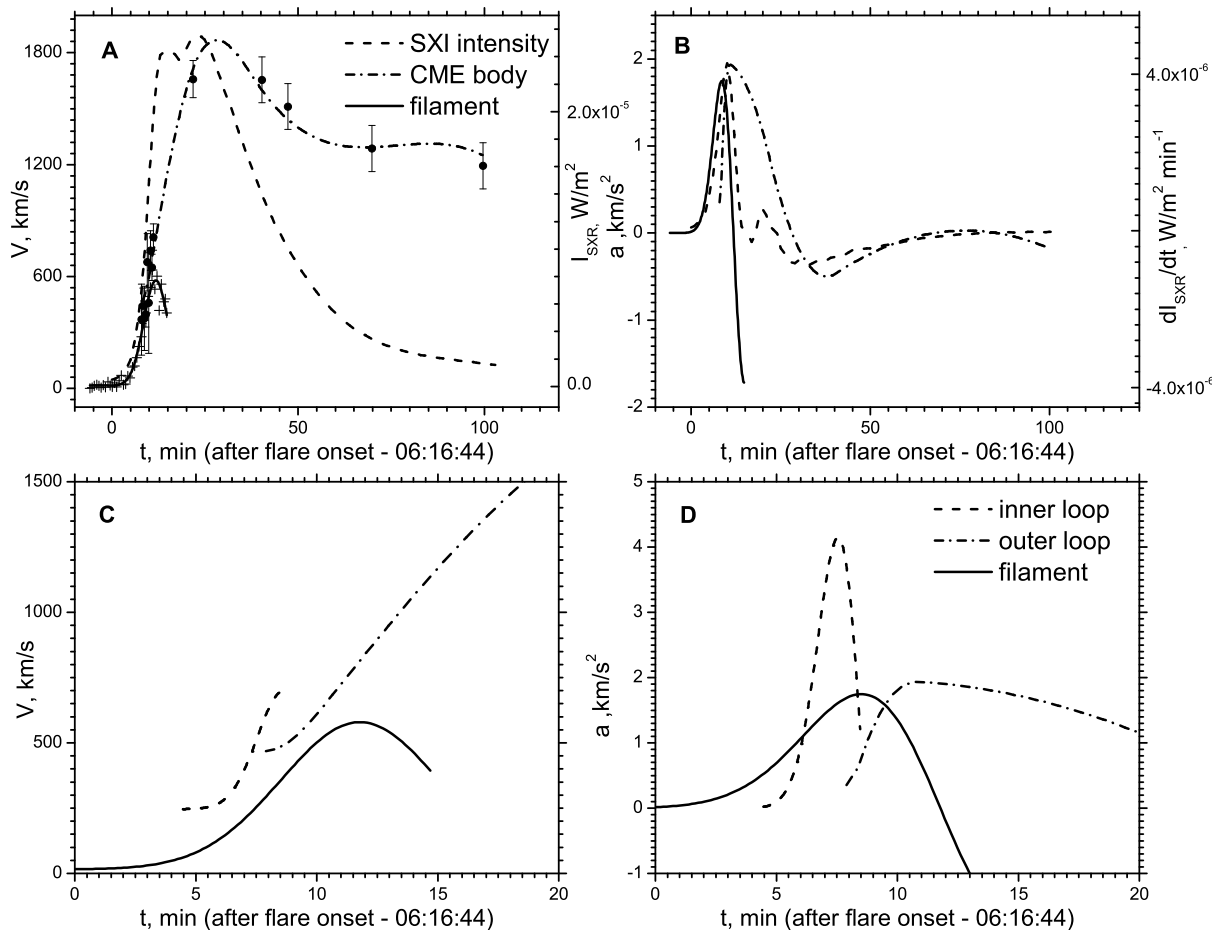


Рис. 2. А, В – скорость и ускорение ЭП (1), одной внутренней структуры (2) и внешней структуры до возникновения КВМ; С, D – скорость и ускорение фронтальной структуры КВМ (сплошная линия). Пунктир на (с) – интенсивность мягкого рентгеновского излучения ISXR из области связанной с КВМ вспышки. Пунктир на (d) – величина $dI_{SXR}(t)/dt$. Эта величина в данном случае рассматривается как аналог интенсивности жесткого рентгеновского излучения согласно эффекту Нюперта (1968)

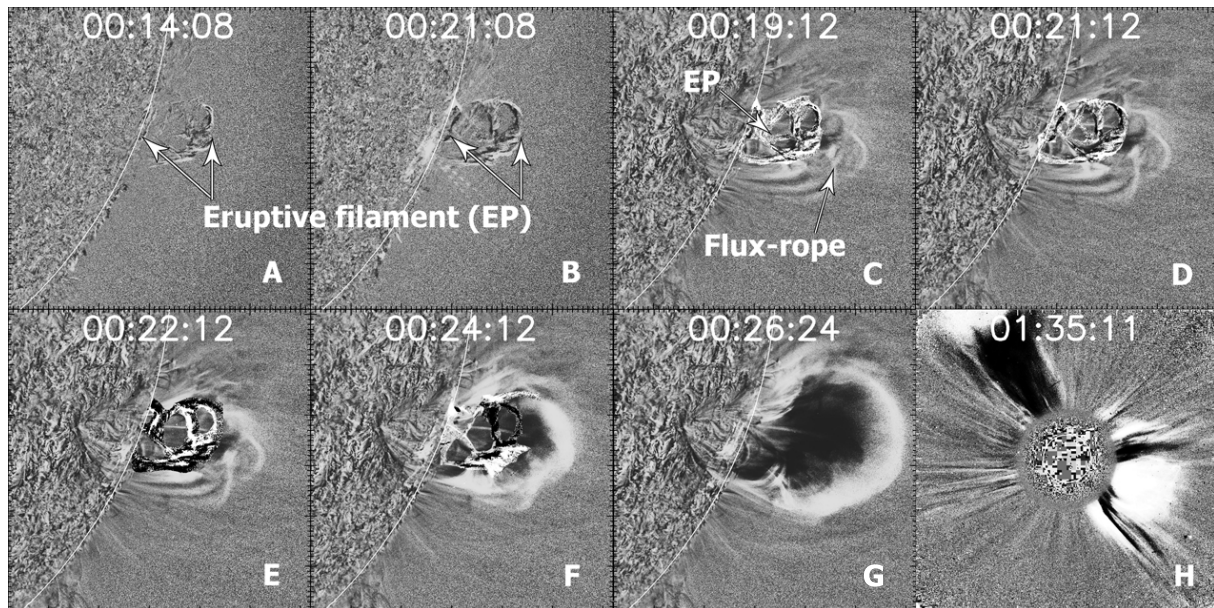


Рис. 3. А, В – иллюстрация эрупции двух протуберанцев. С – магнитоплазменный жгут с наложенным большим протуберанцем. Е–G – формирование фронтальной структуры КВМ на месте жгута. Н – КВМ в поле зрения LASCO C2

Событие 29 июня 2011 г. Процесс формирования этого КВМ существенно отличается от формирования КВМ от 7 июня 2011 г., хотя и в этом случае возникновению выброса массы предшествовала эрупция протуберанца. Здесь реализовался редкий случай. Появлению КВМ предшествует эрупция двух протуберанцев, рис. 3 (а, b). Событие начинается с активизации большого, со сложной структурой, протуберанца. Эта активизация проявляется в усилении яркости отдельных элементов протуберанца и смещении этих элементов друг относительно друга. Эрупция маленького протуберанца вначале сопровождается продолжением активизации большого протуберанца, далее начинается эрупция большого волокна, и затем начинается вспышка. Быстрый рост скорости большого эруптивного протуберанца оказывается синхронизованным с интенсивностью мягкого рентгеновского излучения из области вспышки.

На ранней стадии активизации большого протуберанца начинает светиться расположенный вокруг протуберанца магнитоплазменный жгут с характерной структурой силовых линий магнитного поля (рис. 3 (с)). Когда большой протуберанец начинает двигаться, он, наряду с движением вверх, расширяется. Воздействие этого протуберанца изнутри на разные участки жгута приводит к увеличению яркости жгута, начиная с его верхней части (рис. 3 (d)). Затем эта область повышенной яркости постепенно “заливает”, как белой краской, весь жгут (рис. 3 (e–g)), формируя фронтальную структуру КВМ. После такой “заливки” жгута отдельные его детали перестают быть видимыми. В течение длительного времени отчетливо наблюдавшийся жгут оставался практически неподвижным. Медленное движение жгута началось еще до начала формирования фронтальной структуры в момент времени $\approx 00:20:00$. Это время примерно совпадает с моментом начала связанной вспышки и с началом резкого нарастания скорости маленького протуберанца.

Событие 8 марта 2011 г. Это событие характеризуется несколькими особенностями. Возникновению КВМ предшествует эрупция относительно высокого протуберанца или, скорее всего, высокой аркады петель, рис. 4. Перед началом эрупции вдоль нижней ноги протуберанца начинает

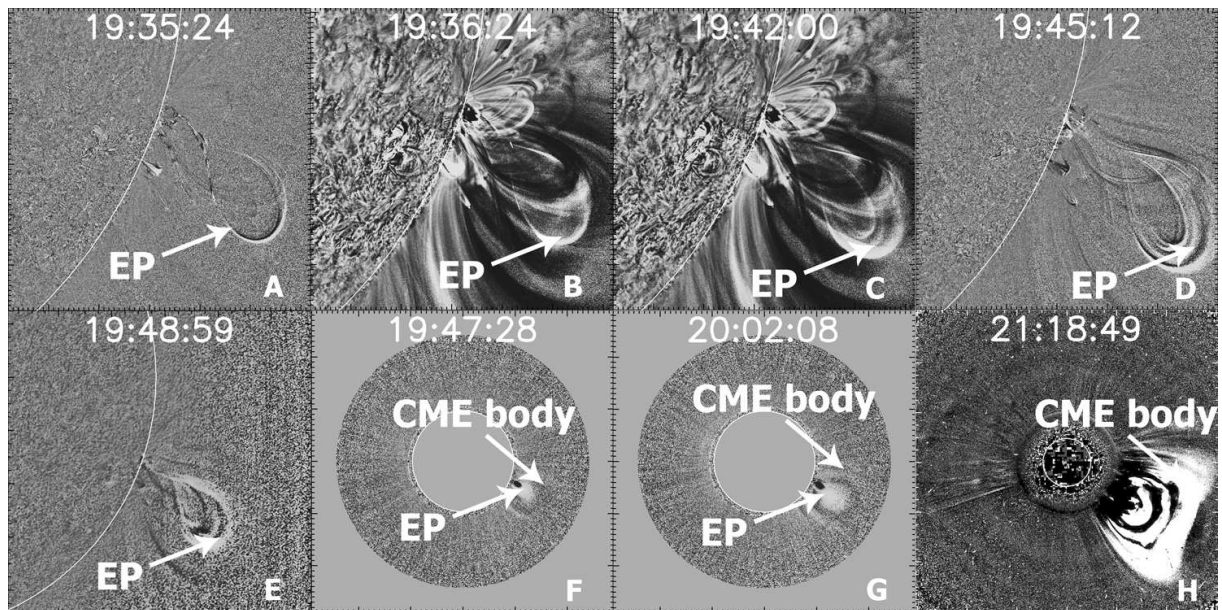


Рис. 4. ЭП по наблюдениям в линии 171 \AA (скользящая разность изображений). Видна цепочка блоков, распространяющаяся вдоль петли протуберанца; В, С – эрупция протуберанца по наблюдениям в линии 171 \AA (разность изображений фрагмента Солнца с вычитанием из всех изображений изображения в фиксированный момент времени); D – протуберанец в линии 193 \AA ; E – протуберанец в линии 174 \AA (PROBA2/SWAP); F, G – ЭП, окруженный фронтальной структурой (ФС) КВМ по данным MarkIV; H – КВМ в поле зрения LASCO

двигаться последовательность структур ограниченной длины (“блобов”). Длина цепочки блобов со временем увеличивается. Есть основание считать, что эти блобы возникли как возмущения, сопровождающие предшествующий КВМ, возникший в той же активной области и движущийся в том же направлении, что и анализируемый КВМ. Является ли появление таких блобов причиной эрупции протуберанца – пока неясно. Заметим, что наиболее отчетливо ЭП наблюдается в линиях 171 \AA (рис. 4 (а-с)), 193 \AA (рис. 4 (d)) и 211 \AA . Из-за большой начальной высоты ЭП не удается увидеть формирование КВМ в поле зрения инструментов SDO и SWAP. Анализ последовательностей изображений, полученных инструментами SDO и PROBA2/SWAP, показал, что движение протуберанца возмущает вышележащие области короны, которые в виде совокупности соприкасающихся петель поднимаются вверх. Но такой картины, как для события 7 июня 2011 г., когда внутренние возмущенные структуры двигались с большей скоростью, чем внешние по отношению к ним структуры, и внутренние структуры догоняли внешние – в этом событии не наблюдается. Оказалось, что возникновение и начальная стадия движения КВМ хорошо наблюдается в поле зрения коронографа MarkIV (рис. 4 (f, g)). Здесь, как и в событии 29 июня 2011 г., возникает жгут в виде петлеобразной области повышенной яркости, охватывающий ЭП, и, спустя некоторое время, жгут начинает поступательное движение с большим ускорением. В процессе формирования жгут, возможно, тоже движется с небольшой скоростью, но оценить ее не удалось из-за недостаточного качества изображений. Таким образом, в целом здесь реализуется сценарий формирования КВМ, частично объединяющий процессы, сопровождавшие возникновение КВМ 29 июня 2011 г. (формирование жгута, его окрашивание белым цветом) и возникновение КВМ 7 июня 2011 г. (воздействие на формирующийся жгут участков короны, возмущенных эруптивным протуберанцем).

Связь между высотами ЭП и КВМ. Наш анализ показал, что существует корреляция между высотой ЭП перед началом его эрупции и высотой фронтальной структуры КВМ перед началом его быстрого движения (рис. 5). Эта корреляция должна быть проверена на большей статистике.

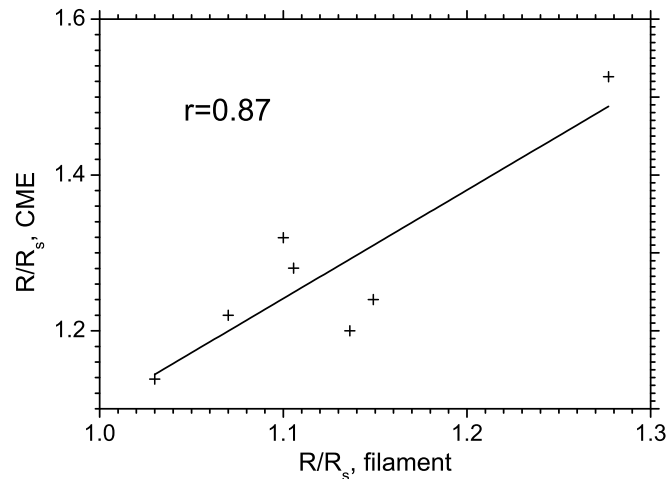


Рис. 5. Связь между высотами ЭП и КВМ

Ударные волны, связанные с КВМ: закономерности распространения и возможная природа. Последние 10 лет были временем интенсивных коронографических и спектроскопических исследований ударных волн, связанных с КВМ (Воурлидас, Бемпорад, 2012). Считается, что ударная волна – это граница диффузной области в поле зрения инструментов SDO или коронографов, например, LASCO, окружающая (не всегда полностью) более яркое тело КВМ (рис. 6 (а)). Но при этом скорость всех участков границы диффузной области, которые принимаются за ударную волну, должна превышать величину $V_{MS} + V_{SW}$. Здесь V_{MS} – скорость быстрых магнитозвуковых волн, V_{SW} – скорость окружающего солнечного ветра, по которому распространяется ударная волна. Ударную волну можно выделить из распределения яркости вдоль прямой линии, пересекающей границу диффузной области. Если на границе диффузной области возникнет резкий скачок яркости, есть основание считать такой скачок ударной волной (Онтиверос, Воурлидас, 2009). Здесь основная проблема заключается в том, что выделить такие скачки удается, как правило, в нескольких небольших по широте участках границы диффузной области. Отсутствие таких скачков на других участках границы диффузной области мы связываем с тем, что шумовая амплитуда яркости на этих участках границы диффузной области сравнима или больше амплитуды ударной волны. Наличие ударных волн в короне определяется также по наблюдениям в некоторых линиях крайнего ультрафиолета, позволяющих оценить наличие скачков плотности, температуры и др. (Бемпорад, Манкусо, 2010). Считается также, что радиовсплески II типа отражают распространение ударной волны. Одним из ключевых вопросов, касающихся ударных волн, связанных с КВМ, является вопрос о природе этих волн: являются ли они поршневыми с телом КВМ в качестве “поршня” или являются взрывными. Мы провели исследование, направленное на поиск ответа на этот вопрос для ударных волн, зарегистрированных в нижней короне по данным инструментов SDO.

На рис. 6 (слева) показан КВМ, зарегистрированный 13.06.2010 г. В нем выделяется более яркая внутренняя часть – тело КВМ, и окружающая его диффузная область. Сопоставив скорость V_{dr} границы диффузной области с оцененной скоростью V_{MS} распространения здесь магнитозвуковых

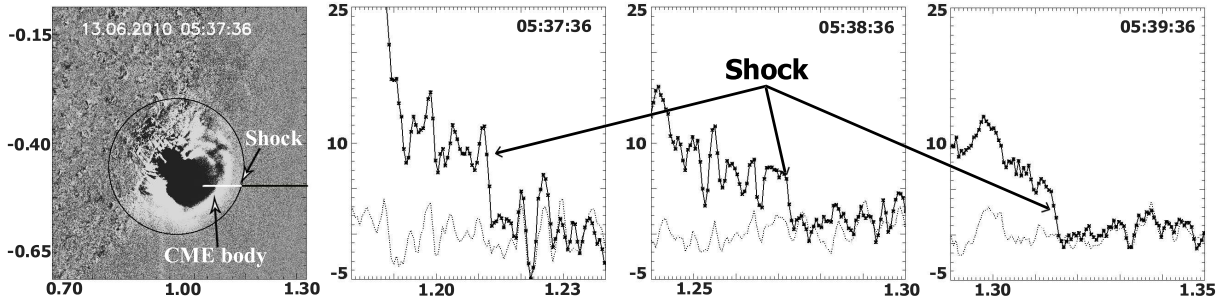


Рис. 6. Слева – КВМ, зарегистрированный 13.10.2010 г. Разностное изображение по данным SDO в линии 211 Å. Прямая линия – линия, вдоль которой сканировалась яркость. Справа от изображения КВМ – ударная волна для трех моментов времени

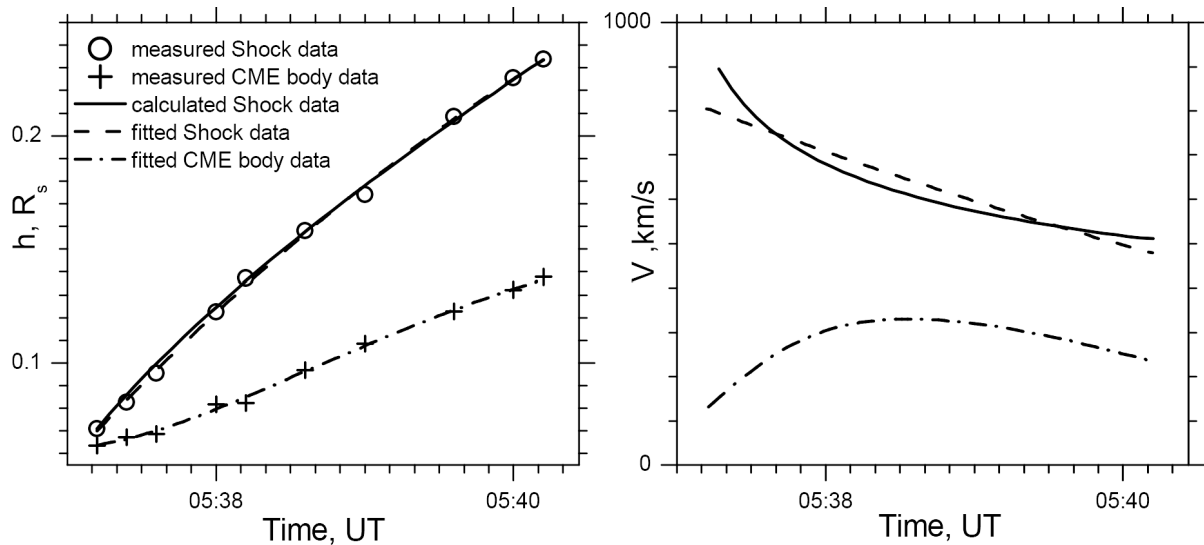


Рис. 7. Слева – зависимость положения ударной волны от времени $h_{SH}(t)$ (сплошные круги; сплошная линия, проходящая через эти точки – линия регрессии); пунктирная линия, проходящая через эти точки – теоретическая зависимость $h_{SH}(t)$ для взрывной ударной волны, распространяющейся в автомодельном режиме; треугольники и сплошная линия внизу положения границы тела КВМ и соответствующая этим точкам линия регрессии. Справа – в зависимости от времени: измеренная скорость ударной волны (производная линии регрессии по времени; верхняя сплошная кривая), рассчитанная скорость ударной волны (пунктирная линия); скорость тела КВМ (нижняя сплошная линия)

волн (скорость солнечного ветра, т. е. направленного от лимба движения вещества, на этих расстояниях в активной области должна быть близка к нулю), имеем $V_{dr} > V_{MS}$. Это означает, что граница диффузной области должна быть ударной волной. Сканирование яркости в указанном на рис. 6 направлении, а также в некоторых других направлениях, позволило выявить на границе диффузной области несколько участков, в пределах которых яркость резко меняется при пересечении границы диффузной области (рис. 6, справа). Такие скачки с шириной $d_{SH} = (1 - 2.5)\delta$, где δ – пространственное разрешение инструмента, мы считаем бесстолкновительными ударными волнами. Ударная

волна для этого события анализировалась также в работе Ма и др. (2011). Из рис. 7 (слева) следует, что измеренная зависимость положения ударной волны от времени $h_{SH}(t)$ хорошо согласуется с теоретической зависимостью $h_{SH}(t)$ распространения взрывной ударной волны в автомодельном приближении: $r(t) = (r_1 - r_0)[(t - t_0)/(t - t_1)]^{2/(5-\delta)} + r_0$ (Уралов и др., 2005). Здесь r_0 , t_0 и δ – свободные параметры, которые подбираются для наилучшего согласия между экспериментальной и теоретической зависимостями $h_{SH}(t)$. Из рис. 7 (справа) следует, что на начальном этапе движения характер изменения скорости ударной волны и тела КВМ существенно различается, и, по мнению авторов работы, это различие не согласуется с представлением о том, что обнаруженная ударная волна является поршневой с телом КВМ в виде поршня. Аналогичный результат был получен для события 7 июня 2011 г. Отличие от события 13 июня 2010 г. заключалось в том, что скорость тела КВМ непрерывно нарастала в поле зрения инструмента SDO, а скорость ударной волны медленно уменьшалась. Это, а также хорошее согласие найденной из наблюдений и теоретической зависимости положения ударной волны от времени, также не согласуется с представлением, что данная ударная волна является поршневой.

4 Выводы

Кратко сформулируем выводы работы:

1. Формирование корональных выбросов массы, связанных с эрупцией протуберанца (или горячей эмиссионной петли) протекает не по одному “сценарию”, а характеризуется особенностями для разных выбросов массы. Приведены примеры трех возможных сценариев возникновения КВМ.

2. Ударная волна, связанная с КВМ, в нижней короне ведет себя как взрывная, а не как поршневая с телом КВМ в качестве поршня.

Работа выполнена при частичной поддержке ГК № 02.740.11.0576 Федеральной программы “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России”. Авторы благодарны командам GOES, RHESSI, SOHO/LASCO, MarkIV (MLSO), SDO/AIA и PROBA2/SWAP за возможность свободно использовать данные этих инструментов. Авторы благодарны В.В. Гречневу за полезные обсуждения результатов работы.

Литература

- Бак-Стесличка и др. (Bał-Stęślicka U., Kołomański S., Mrozek T.) // *Solar Phys.* 2013. V. 283. P. 505.
- Бейн и др. (Bein B.M., Berkebile-Stoiser S., Veronig A.M., Temmer M., Muhr N., Kienreich I., Utz D., Vršnak B.) // *Astrophys. J.* 2011. V. 738. P. 191.
- Бейн и др. (Bein B.M., Berkebile-Stoiser S., Veronig A.M., Temmer M., Vršnak B.) // *Astrophys. J.* 2012. V. 755. P. 44.
- Бемпорад, Манкусо (Bemporad A., Mancuso S.) // *Astrophys. J.* 2010. V. 720. P. 130.
- Беркебайл-Стойзер и др. (Berkebile-Stoiser S., Veronig A.M., Bein B.M., Temmer M.) // *Astrophys. J.* 2012. V. 753. P. 88.
- Воурлидас, Бемпорад (Vourlidas A., Bemporad A.) // *AIP Conf. Proc.* 2012. V. 1436. P. 279. doi: 10.1063/1.4723620.
- Вршнак и др. (Vršnak B., Maričić D., Stanger A.L., Veronig A.M., Temmer M., Roša D.) // *Solar Phys.* 2007. V. 241. P. 85.
- Галлахер и др. (Gallagher P.T., Lawrence G.R., Dennis B.R.) // *Solar Phys.* 2003. V. 588. P. 53.
- Жанг и др. (Zhang J., Dere K.P., Howard R.A., Kundu M.R., White S.M.) // *Astrophys. J.* 2001. V. 559. P. 452.
- Жанг, Дере (Zhang J., Dere K.P.) // *Astrophys. J.* 2006. V. 649. P. 1100.
- Ма и др. (Ma S., Raymond J.C., Golub L., Huadong J.L., Lin J., Chen H., Grigis P., Testa P., Long D.) // *Astrophys. J.* 2011. V. 738. P. 160.
- Марисич и др. (Maričić D., Vršnak B., Roša D.) // *Solar Phys.* 2009. V. 260. P. 177.

- Марисич и др. (Maričić D., Vršnak B., Stanger A.L., Veronig A.M., Temmer M., Roša D.) // Solar Phys. 2007. V. 241. P. 99.
- Нюперт (Neupert W.M.) // Astrophys. J. 1968. V. 153. P. L59.
- Онтиверос, Воурлидас (Ontiveros V., Vourlidas A.) // Astrophys. J. 2009. V. 693. P. 267.
- Патсоуракос и др. (Patsourakos S., Vourlidas A., Stenborg G.) // Astrophys. J. Lett. 2010. V. 724. P. L188.
- Патсоуракос и др. (Patsourakos S., Vourlidas A., Stenborg G.) // Astrophys. J. 2013. V. 764. P. 125.
- Теммер и др. (Temmer M., Veronig A.M., Kontar E.P., Krucker S., Vršnak B.) // Astrophys. J. 2010. V. 712. P. 1410.
- Теммер и др. (Temmer M., Veronig A.M., Vršnak B., Rybak J., Gömöry P., Stoiser S., Maričić D.) // Astrophys. J. 2008. V. 673. P. L95.
- Уралов и др. (Uralov A.M., Grechnev V.V., Hudson H.S.) // Geophys. Res. 2005. V. 110. A05104.
- Файнштейн, Загайнова (Fainshtein V.G., Zagainova Yu.S.) // eprint arXiv:1208.5890. 2012.
- Файнштейн В.Г., Егоров Я.И. // Космич. исслед. 2013. Т. 51. С. 4.
- Шанмугараджу и др. (Shanmugaraju A., Moon Y.-J., Cho K.-S., Bong S. C., Gopalswamy N., Akiyama S., Yashiro S., Umaphathy S., Vršnak B.) // Astrophys. J. 2010. V. 708. P. 450.