

ФОРМИРОВАНИЕ И НАЧАЛЬНАЯ СТАДИЯ ДВИЖЕНИЯ КОРОНАЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ МАССЫ

Я.И. Егоров, В.Г. Файнштейн

FORMATION OF CORONAL MASS EJECTIONS AND INITIAL STAGE OF THEIR MOTION

Ya.I. Egorov, V.G. Fainshtein

По данным космических аппаратов SDO, PROBA2 и др. выявлены процессы, предшествующие появлению и сопровождающие возникновение фронтальной структуры десяти лимбовых корональных выбросов массы (КВМ), а также изучены закономерности движения КВМ на начальном этапе. Одним из таких процессов оказалась эрупция протуберанца или горячей эмиссионной петли, наблюдаемых в линиях крайнего ультрафиолета. Типичным процессом для большинства рассмотренных КВМ оказалось появление в области их генерации одной или нескольких движущихся в направлении от центра солнечного диска структур повышенной яркости и одновременно выделение несколькими участками повышенной яркости места, где в дальнейшем сформируется фронтальная структура КВМ. Установлено, что она возникает и начинает двигаться в направлении от лимба после соприкосновения с местом ее формирования движущихся внутренних структур. Обнаружена положительная корреляция между высотой эруптивного протуберанца, связанного с КВМ, и высотой фронтальной структуры КВМ перед началами их движений.

We identified processes preceding the appearance of a front structure for ten limb CMEs and studied regularities in CME motion at the initial stage based on SDO, PROBA2 and other spacecraft data. One of these processes was prominence (or hot emission loop) eruption observable in EUV. A typical process for most of CMEs was the appearance in the eruption region of one or more bright loops moving outward from the solar disk centre and a simultaneous appearance of bright areas above these loops where the frontal CME structure was subsequently formed. It was established that the frontal CME structure starts to move upon the contact with moving internal loops. A positive correlation has been found between the height of CME associated eruptive prominence and the height of CME front structure before the start of their movement.

Введение

Физические механизмы генерации корональных выбросов массы (КВМ) во многом остаются невыясненными [Forbes et al., 2006]. Можно ожидать существенного продвижения в решении этой важной проблемы физики Солнца, если для изучения формирования и начальной стадии движения КВМ использовать данные с высоким временным и пространственным разрешением инструментов AIA, установленных на борту SDO, а также данных телескопа PROBA2/SWAP с полем зрения, большим, чем у инструментов AIA.

Уже получены первые важные результаты с использованием AIA [Patsourakos et al., 2010; 2013; Файнштейн, Егоров, 2013]. В первой работе сделан вывод о том, что начальное движение КВМ (событие 13.06.2013) проходит три фазы: медленное автомодельное расширение, быстрое кратковременное поперечное сверхрасширение и автомодельное расширение, пока КВМ находится в поле зрения инструментов AIA. Фаза поперечного сверхрасширения согласуется с фазой замедления КВМ. В работе [Patsourakos et al., 2013] показано, что формирование одного КВМ (18–19 июля 2012) проходило стадию заблаговременного (за ≈ 7 ч) возникновения наблюдаемого в высокотемпературной линии солнечного излучения жгута, связанного с ограниченной вспышкой, его последующего охлаждения и эрупции, сопровождающейся эруптивной вспышкой. Файнштейн и Егоров (2013) установили морфологическую последовательность явлений, сопровождающих формирование шести лимбовых КВМ.

В последнее десятилетие было выполнено несколько исследований начальной стадии движения КВМ [Gallagher et al., 2003; Zhang, Dere, 2006; Temmer et al., 2008; 2010; Файнштейн, Егоров, 2013 и

цитируемая там литература]. Выявлены особенности изменения скорости и ускорения выбросов на начальной стадии движения. Обнаружена тесная связь между ускорением КВМ и выделением энергии в связанных солнечных вспышках, найдены закономерности изменения геометрических параметров КВМ.

В настоящей работе продолжено изучение формирования КВМ нового солнечного цикла по данным инструментов SDO/AIA и PROBA2/SWAP, а также проведено исследование начальной стадии движения КВМ с использованием объединенных данных космических аппаратов SDO, PROBA2, Mark IV и SOHO.

Результаты

Анализ показал, что процесс формирования отобранных для исследования импульсных лимбовых КВМ состоит из следующих этапов.

1. Эрупция волокна (протуберанца) или горячей эмиссионной петли по наблюдениям Солнца в линии 30.4 нм и в некоторых случаях по наблюдениям в линии H α .

2. Возникновение солнечной вспышки спустя несколько минут после начала эрупции протуберанца (эмиссионной петли).

3. Возмущение (для восьми из десяти рассмотренных событий) эруптивным волокном (эмиссионной петлей) вышележащих корональных структур, приводящее к возникновению последовательности нескольких движущихся вверх петлеобразных или иных по форме структур (одна-две и более), наблюдаемых в спектральных линиях 171, 193, 211 Å и др. и движущихся с разными скоростями.

4. Одновременно выше движущихся структур и на определенном расстоянии от места эрупции начинают

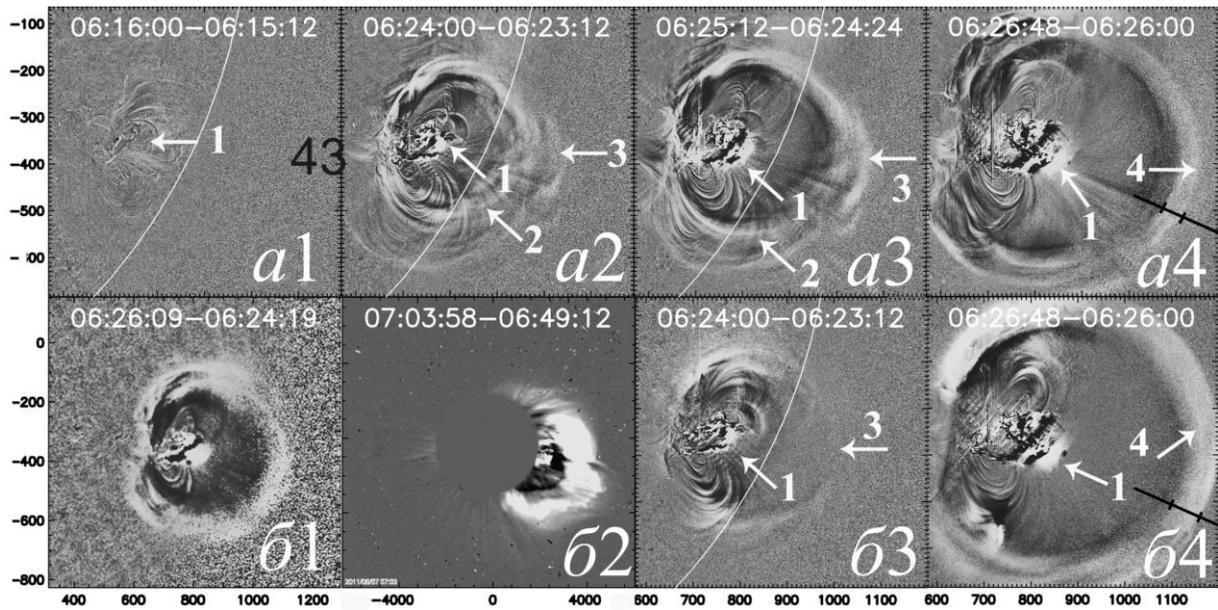


Рис. 1. Формирование КВМ 07.06.2011 г.: $a1$ – $a4$ – изображения, полученные SDO/AIA в линии 171\AA ; $b1$ – изображение по данным PROBA2 (174\AA); $b2$ – КВМ в поле зрения LASCO C2; $b3$, $b4$ – в линии 211\AA ; 1 – эруптивный протуберанец; 2 – внутренние петлеобразные структуры; 3 – место формирования фронтальной структуры; 4 – сформировавшаяся фронтальная структура.

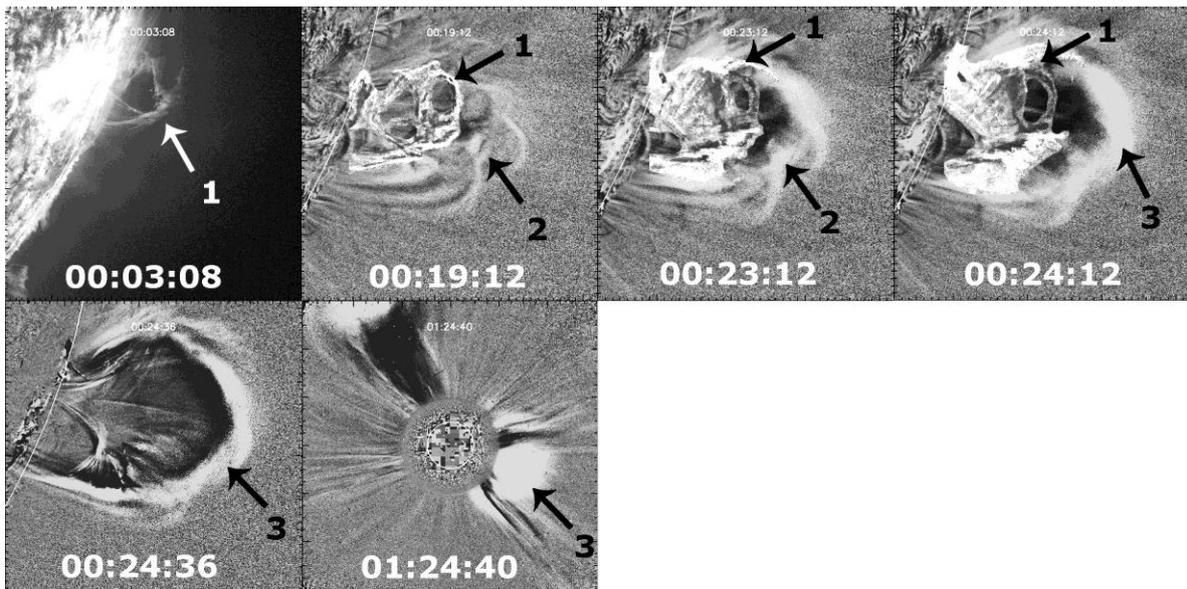


Рис. 2. Событие 29.06.2011 г. Изображение Солнца на левой верхней панели и протуберанцы (стрелки 1) на следующих трех панелях получены в линии 304\AA . Магнитный жгут – место формирования фронтальной структуры (ФС) КВМ (стрелки 2), а также КВМ со сформировавшейся ФС (нижняя панель слева, стрелка 3) получены в линии 171\AA .

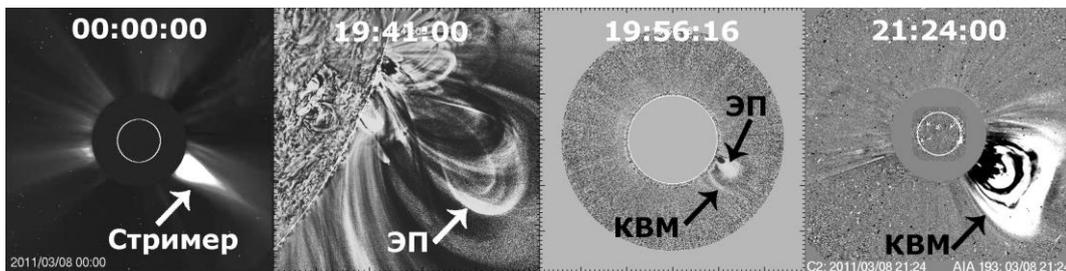


Рис. 3. Событие 8 марта 2011 г. Слева направо: стример, отражающий участок пояса стримеров, почти перпендикулярного плоскости неба; эруптивный протуберанец (или аркада петель), зарегистрированный в линии 171\AA ; движущийся КВМ и эруптивный протуберанец в поле зрения MarkIV; КВМ в поле зрения LASCO C2 (его центральная часть тормозится сильнее, чем периферийные части).

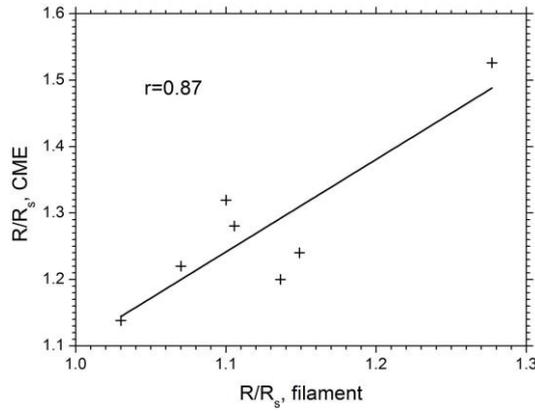


Рис. 4. Положительная корреляция между высотой эруптивного протуберанца непосредственно перед началом его эрупции и высотой фронтальной структуры КВМ перед началом его движения.

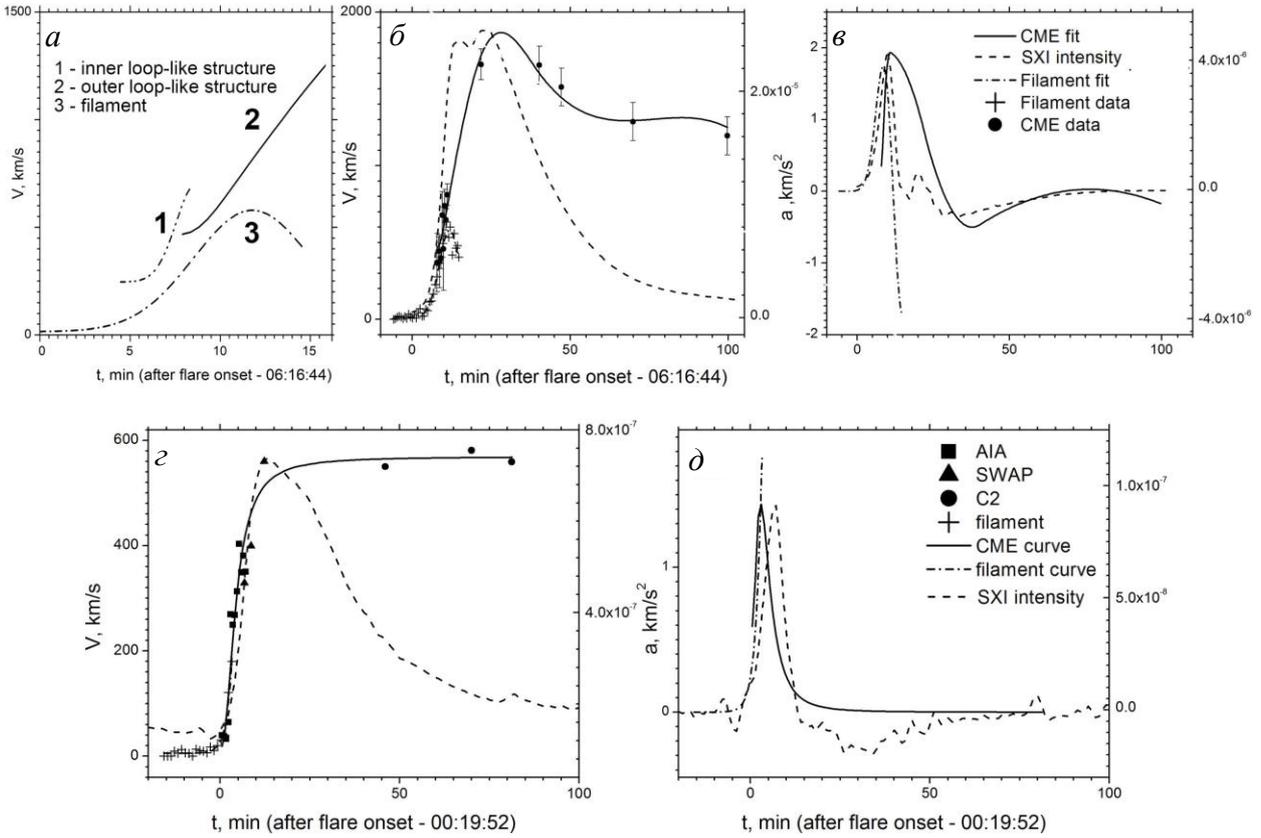
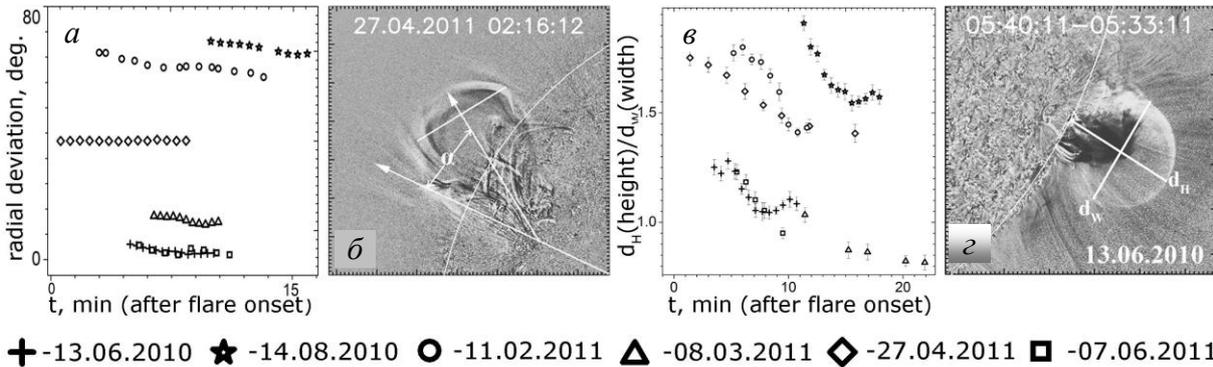


Рис. 5. Кинематика различных структур в процессе формирования и начальной стадии движения КВМ: а – скорость внешней и внутренней петлевых структур и эруптивного протуберанца (ЭП); б – скорость $V(t)$ ЭП и фронтальной структуры КВМ для события 07.06.2011 г.; в – ускорение $a(t)$. Штриховая кривая – зависимость $I_{SXR}(t)$ и $dI_{SXR}(t)/dt$. Панели з, д – скорость и ускорение КВМ и ЭП 29.06.2011 г.



✚ -13.06.2010 ☆ -14.08.2010 ○ -11.02.2011 ▲ -08.03.2011 ◇ -27.04.2011 □ -07.06.2011

Рис. 6. Отклонение траектории КВМ от радиального направления (а); иллюстрация расчетов (б, з); изменение со временем отношения $d_H/d_W(t)$ продольного размера КВМ к поперечному (в).

формироваться несколько участков повышенной яркости (на разностных изображениях Солнца), остающихся практически неподвижными до определенного времени. Эти участки в некоторых случаях очерчивают типичную конфигурацию flux-горы. Это выделяются места последующего формирования ФС.

5. Когда внутренние движущиеся структуры достигают неподвижных участков повышенной яркости непосредственно по ходу своего движения и/или их боковых частей, усиливается яркость этих участков и на их месте формируется непрерывная ФС КВМ – область повышенной яркости. В одном случае образование ФС обусловлено воздействием на место ее образования эруптивного протуберанца.

6. Фронтальная структура начинает поступательное движение. Обычно отдельные участки ФС начинают свое движение не одновременно. Это можно проиллюстрировать несколькими примерами (рис. 1–4).

Отметим некоторые особенности начальной стадии движения рассмотренных КВМ.

1. Девять из десяти КВМ начали свое движение после начала связанной с КВМ рентгеновской вспышки. В то же время эрупция волокна для шести событий начинается раньше соответствующей вспышки.

2. Внутренние структуры, воздействие которых на место формирования ФС приводит к ее возникновению, движутся с разными скоростями. Структуры, возникшие позднее, движутся с большими скоростями, догоняя структуры, возникшие раньше.

3. Временной профиль скорости $V(t)$ восьми из десяти КВМ представляет собой последовательность трех различных участков. Вначале происходит быстрое нарастание скорости до максимального значения, затем примерно за 15–40 мин скорость уменьшается более чем на 100 км/с и далее скорость КВМ слабо изменяется со временем. В двух случаях после достижения максимума скорость практически не меняется со временем.

4. Кинематика КВМ синхронизована с зависимостью от времени интенсивности мягкого рентгеновского излучения $I_{\text{SXR}}(t)$, $dI_{\text{SXR}}(t)/dt$ и с потоком жесткого рентгеновского излучения $I_{\text{HXR}}(t)$ из области связанной с КВМ вспышки. Это согласуется с результатами, полученными ранее во многих работах [Gallagher et al., 2003; Zhang, Dere, 2006; Temmer et al., 2008; 2010 и цитируемая там литература]. На рис. 5 приведены примеры кинематики рассмотренных КВМ на начальной фазе их движения.

Для шести рассмотренных КВМ были получены сведения об изменении некоторых их геометрических параметров, а также о характере траектории во время начальной стадии движения КВМ. Показано, что на начальном этапе движения все шесть КВМ движутся не радиально, причем для двух КВМ начальное отклонение от радиального направления составило около 70° (рис. 6). Оказалось, что для всех этих КВМ спустя небольшое время после начала движения наступает период поперечного сверхрасширения (рис. 6, в; см. также Введение). Показано, что начальный угловой размер КВМ $2\alpha_0$ составляет $\approx 2.5\text{--}12^\circ$, со временем он увеличивается, диапазон изменения $2\alpha_0$ в поле зрения AIA достигает 1.5–4.

Авторы благодарны командам SDO/AIA, PROBA2/SWAP, SOHO/LASCO и MarkIV за возможность свободного использования данных этих инструментов. Работа выполнена при поддержке ГК № 02.740.11.0576 по ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Файнштейн В.Г., Егоров Я.И. Исследование свойств КВМ с использованием данных космических аппаратов SDO и PROBA2 // Космические исследования. 2013. № 51. С. 4–16
- Forbes T.G., et al. CME theory and models // Space Sci. Rev. 2006. V. 123. P. 251–302.
- Gallagher P.T., et al. Rapid acceleration of a coronal mass ejection in the low corona and implications for propagation // The Astrophysical J. 2003. V. 588. P. L53–L56.
- Patsourakos S., Vourlidas A., Stenborg G. The genesis of an impulsive coronal mass ejection observed at ultra-high cadence by AIA on SDO // ApJ. Lett. 2010. V. 724, iss. 2. P. L188–L193.
- Patsourakos S., Vourlidas A., Stenborg G. Direct evidence for a fast coronal mass ejection driven by the prior formation and subsequent destabilization of a magnetic flux rope // Astrophys. J. 2013. V. 764, iss. 2. P. 125–137.
- Temmer M., Veronig A.M., Vršnak B., et al. Acceleration in fast halo CMEs and synchronized flare HXR bursts // Astrophys. J. 2008. V. 673. P. 95–98.
- Temmer M., Veronig A.M., Kontar E.P. et al. Combined STEREO/RHESSI study of coronal mass ejection acceleration and particle acceleration in solar flares // Ibid. 2010. V. 712. P. 1410–1420.
- Zhang J., Dere K.P. A statistical study of main and residual accelerations of coronal mass ejections // Ibid. 2006. V. 649. P. 1100–1109.

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия