

УДК 523.98

ИССЛЕДОВАНИЕ КОРОНАЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ МАССЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ С ВЫСОКИМ ВРЕМЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ НОВОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА PROBA-2

Я.И. Егоров, В.Г. Файнштейн

INVESTIGATING CORONAL MASS EJECTIONS USING HIGH-RESOLUTION DATA FROM NEW PROBA-2 SPACECRAFT

Ya.I. Egorov, V.G. Fainshtein

Показано, что новый телескоп SWAP/PROBA-2 является эффективным прибором для изучения начальной стадии движения лимбовых эруптивных структур (эруптивного протуберанца, коронального выброса массы (КВМ) и др.). С помощью этого телескопа исследована начальная стадия движения шести лимбовых КВМ нового солнечного цикла.

It has been shown that the new SWAP/PROBA-2 telescope is an effective device for studying the initial phase of motion of limb eruptive structures (eruptive prominence, coronal mass ejection (CME), etc.). The telescope has been used to examine the initial phase of motion of six limb CMEs of the new solar cycle.

Введение

Физические механизмы формирования корональных выбросов массы (КВМ) во многом остаются неясными. Нахождение экспериментальных закономерностей движения КВМ сразу после его возникновения может помочь выбрать наиболее адекватную модель формирования корональных выбросов массы. Для изучения начальной стадии движения КВМ нужны данные с высоким временным разрешением. Такие данные обеспечивают в настоящее время несколько телескопов, установленных на космических аппаратах: TRACE, SXI/GOES, EUVI (STEREO A, B), AIA/SDO. По данным этих телескопов были изучены различные аспекты движения КВМ на начальной стадии их движения (см. статьи [Zhang et al., 2006; Temmer et al., 2008; Maricic et al., 2009; Temmer et al., 2010] и цитируемые в них работы). В то же время многие детали начального движения КВМ остаются неизученными, что стимулирует продолжение исследования этих движений корональных выбросов массы.

Второго ноября 2009 г. был запущен новый космический аппарат (КА) европейского космического агентства PROBA-2 с несколькими инструментами на борту для солнечных наблюдений и для изучения космической погоды. Установленный на борту этого КА телескоп SWAP обеспечивает наблюдение Солнца в линии крайнего ультрафиолета с длиной волны 171 Å (FeX, FeXI) с высоким временным (1 мин) и пространственным разрешением (3.17"). Еще один прибор (LYRA) на борту PROBA-2 регистрирует солнечное излучение в нескольких участках спектра в диапазоне длин волн от мягкого рентгеновского излучения до ультрафиолета. К преимуществам этих инструментов относятся: 1) самое большое у SWAP поле зрения (54°) по сравнению с перечисленными выше инструментами; 2) достаточное для предварительного анализа начальной кинематики КВМ временное разрешение SWAP; 3) возможность оперативно связать кинематику КВМ с временным ходом излучений в различных участках спектра из области связанных с КВМ вспышек по данным LYRA.

В настоящей работе приводятся первые результаты изучения характеристик КВМ нового солнечного цикла на начальной стадии их движения с исполь-

зованием данных SWAP/PROBA-2, которые объединяются с данными коронографов LASCO C2 и C3.

Данные и методы исследования

Для анализа кинематики КВМ мы использовали калиброванные изображения Солнца с уровнем обработки данных Level 1, полученные телескопом SWAP [<http://PROBA-2.oma.be/swap/data/bsd>]. Для изучения движения КВМ на больших расстояниях использовались данные коронографов LASCO C2, C3, [<http://sharpp.nrl.navy.mil/cgi-bin/swdbi/lasco/images/form>], установленных на борту космического аппарата SOHO. Для получения сведений о вариациях со временем в период эрупции КВМ-излучения в нескольких спектральных диапазонах использовались данные инструмента LYRA [<http://PROBA-2.oma.be/index.html/science>]. Для одного события изменение со временем основного ускорения сравнивалось с зависимостью от времени интенсивности жесткого рентгеновского излучения, зарегистрированного RHESSI [<http://sprg.ssl.berkeley.edu/~tohan/browser>] в диапазоне энергий 25–50 кэВ из области связанной с КВМ вспышки. В работе проанализированы практически все лимбовые КВМ, зарегистрированные SWAP с июня 2010 по март 2011 г.: 13.06.2010; 14.08.2010; 18.08.2010; 11.02.2011; 08.03.2011; 27.03.2011.

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 $t = (t_{i+1} + t_i) / 2$. Полученные значения $V_i(t)$ аппроксимировались бисплайнами (B-splines) 3-го порядка с учетом погрешности определения $V_i(t)$ в каждый момент времени. В результате получалась гладкая функция $V_i(t)$. В случае расчетов скорости в поле зрения коронографов LASCO положение фронта КВМ определялось из каталога [http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list]. Ускорение КВМ находилось из соотношения: $a(t) = dV(t) / dt$.

2. Результаты

На рис. 1, а, б для события 13.06.2010 показаны полученные по данным SWAP разностные изображения

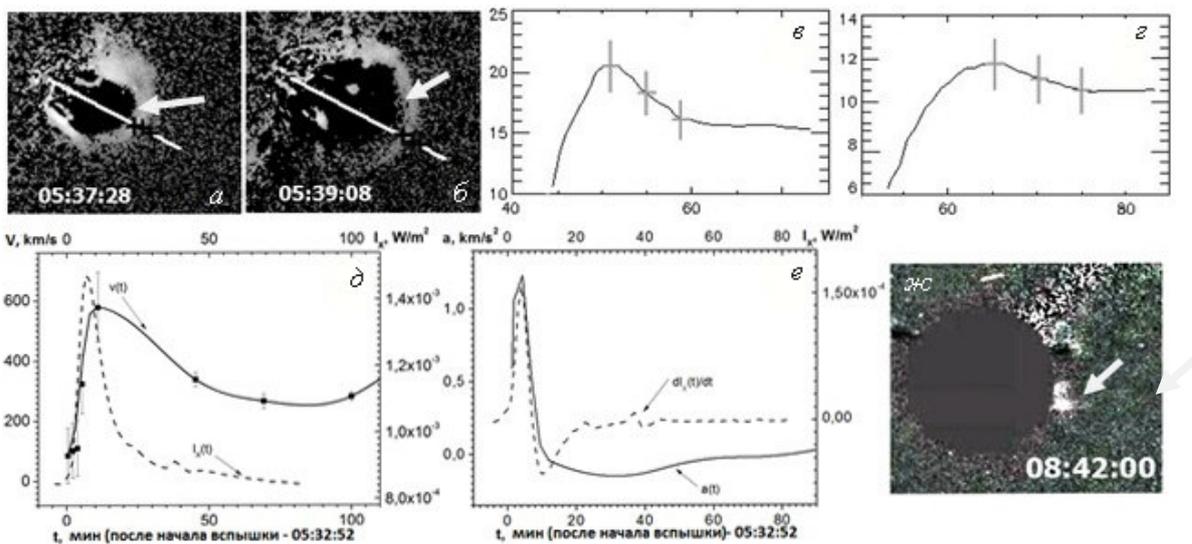


Рис. 1. КВМ 13.06.2010 г. *a, б* – примеры КВМ на начальной стадии движения (разностные изображения); *в, г* – фрагменты сканов яркости в области фронта КВМ, на которых показаны вершина, середина и основание фронта; стрелкой указан КВМ; *д* – зависимости от времени скорости фронта КВМ (символами указаны значения скорости, полученные по измерениям положений вершины и основания фронта КВМ, плавная сплошная линия – аппроксимация экспериментальных значений скорости биспланями 3-го порядка и обозначенная $V(t)$) и интенсивности мягкого рентгеновского излучения $I_x(t)$ по данным LYRA; *е* – сравнение ускорения КВМ $a(t)=dV(t)/dt$ с производной интенсивности мягкого рентгеновского излучения $dl_x(t)/dt$; *ж* – разностное изображение на LASCO C2.

Солнца, когда из каждого вычиталось его изображение в ближайший более ранний момент времени. На этих рисунках видна движущаяся в направлении от Солнца петлеобразная структура. Мы предполагаем, что эта структура – КВМ. То, что эта структура не является эруптивным протуберанцем, подтверждает анализ данных EIT/SOHO, CHIP (MLSO) и др. для 11–13.06.2010. На рис. 1, *в, г* приведены фрагменты сканов яркости для таких изображений вдоль указанных на рис. 1, *a, б* направлений. Видно, что на сканах яркости выделяется фронт КВМ, на котором отмечены три особенности: вершина, середина и основание фронта.

Рис. 1, *д* показывает изменение со временем скорости фронта КВМ, а также зависимость от времени интенсивности мягкого рентгеновского излучения I_x по данным инструмента LYRA. Из этого рисунка следует, что движение КВМ началось позднее начала вспышки, связанной с КВМ. На рис. 1, *е* показаны ускорение $a(t)$ и производная интенсивности мягкого рентгеновского излучения $dl_x(t)/dt$. Наиболее примечательная особенность $V(t)$ – быстрый спад скорости после достижения максимального значения до выхода КВМ в поле зрения LASCO C2. Ускорение КВМ быстро достигает максимального значения, а затем уменьшается, вплоть до изменения знака, и на поздней стадии движения $a(t)$ плавно по модулю уменьшается, оставаясь отрицательным, что, по-видимому, отражает автомодельность движения КВМ на этой стадии. Полуширина $a(t)$ больше полуширины $dl_x(t)/dt$.

Близкими свойствами обладает более быстрый КВМ, зарегистрированный 14.08.2010 г. (рис. 2, *a–в*), который сопровождается эруптивным волокном. В то же время для КВМ, зарегистрированного 08.03.2011 г., соответствие между $a(t)$ и $I_x(t)$

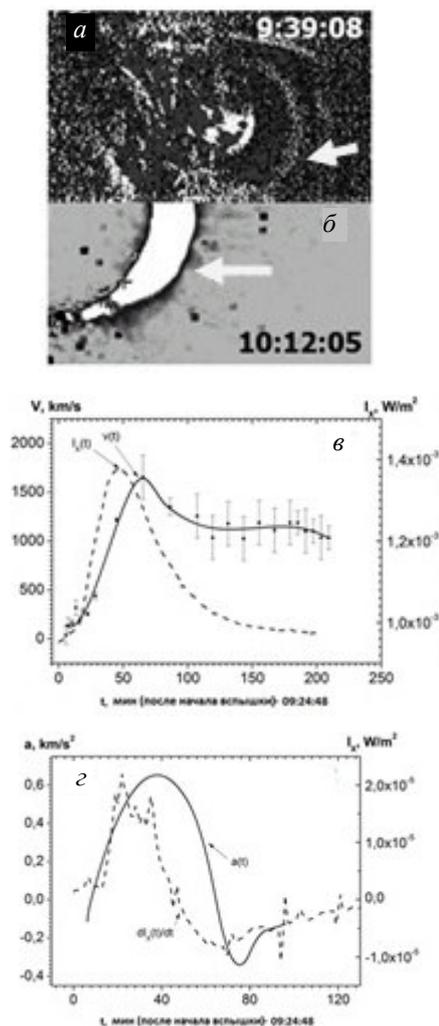


Рис. 2, *a–г*. КВМ 14.08.2010 г. То же, что на рис. 1, *a, ж, д, е*.

носит совсем другой характер, чем для КВМ от 13.06.2010 г. и 14.08.2010 г. (рис. 3, а-в). Скорость КВМ достигает своего максимального значения (см. измеренные скорости) за ≈ 10 мин до момента максимума $I_X(t)$, а ускорение КВМ становится максимальным раньше, чем достигают своих максимумов $dI_X(t)/dt$ и интенсивность жесткого рентгеновского излучения I_{HX} . Еще одна особенность $a(t)$ этого КВМ – резкий излом ускорения происходит примерно вблизи момента, когда $dI_X(t)/dt$ и I_{HX} достигают своих максимумов. Мы предполагаем, что это отражает некоторые физические детали ускорения этого КВМ, обсуждение которых выходит за рамки данной статьи.

Ниже мы приведем некоторые обобщающие результаты нашего анализа изученных КВМ.

1. Из шести рассмотренных КВМ пять начали свое поступательное движение после начала связанных с ними вспышек. Один КВМ, возможно, начал двигаться до начала или во время начала вспышки.

2. Показано, что ускорения $a_{\max} = V_{\max}/t_{\text{acc}}$, измеренная длительность основного ускорения t_{acc} , длительность, нарастания интенсивности мягкого рентгеновского излучения из области связанной с КВМ вспышки $t_{\text{FL-PR}}$, а также ускорение, определяемое из соотношения $V_{\max}/t_{\text{FL-PR}}$ (здесь V_{\max} – максимальная скорость КВМ), связаны соотношениями, близкими к соотношениям, полученным в работе [Zhang, Dere, 2006]. Подтвердилась также обратно-пропорциональная связь между a_{\max} и t_{acc} ($t_{\text{FL-PR}}$), обнаруженная в цитируемой работе (рис. 4, а).

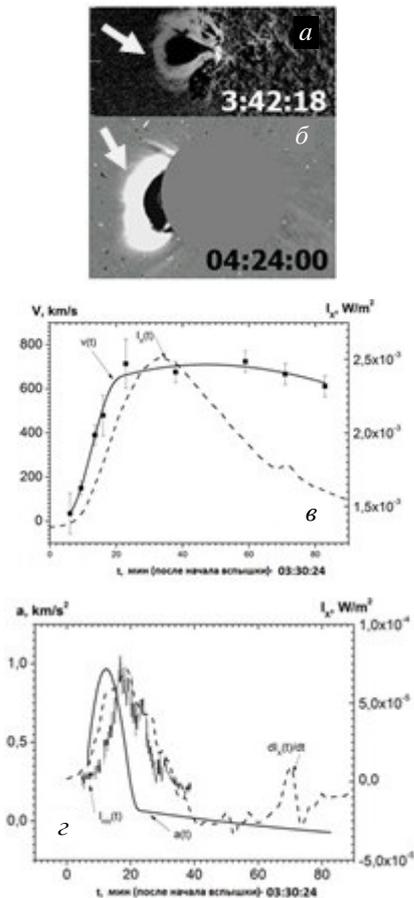


Рис. 3, а-г. КВМ 08.03.2011 г. То же, что, что на рис. 2, а-г.

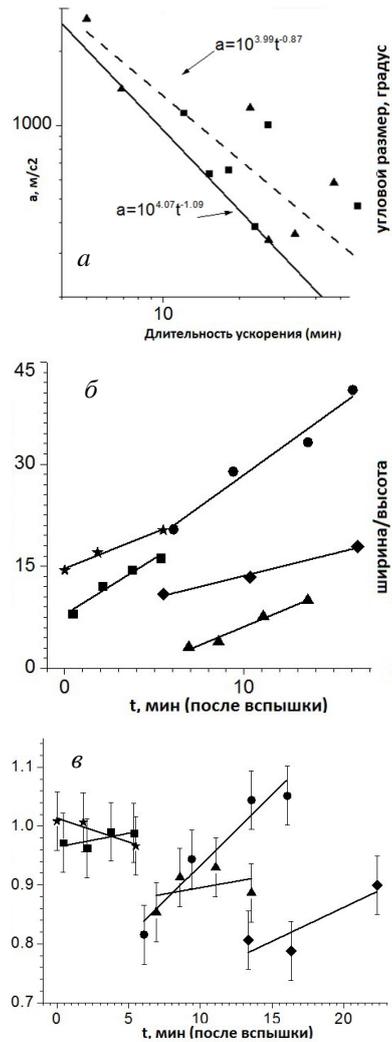


Рис. 4. Связь между максимумом ускорения КВМ a_{\max} и временем ускорения t_{acc} (квадраты), а также временем нарастания интенсивности мягкого рентгеновского излучения от начала вспышки до максимального значения ($t_{\text{FL-PR}}$) (треугольники). Длинная сплошная прямая – линия регрессии для аналогичной зависимости из работы [Zhang et al., 2006] (а); изменение углового размера КВМ в зависимости от времени. Для 4 событий вершина угла, определяющего размер КВМ, помещалась в центре солнечного диска, для КВМ от 14.08.2010 г. и 18.08.2010 г. центр угла помещался на линии, проходящей через середину петли КВМ и источник КВМ на расстоянии одного радиуса Солнца (б); изменение со временем отношения ширины КВМ к его высоте. Квадраты – 13.06.2010, ромбы – 14.08.2010, треугольники – 11.02.2011, круги – 08.03.2011, звездочки – 27.03.2011 (в).

3. Угловой размер 5 из 6 рассмотренных КВМ растет со временем и для некоторых выбросов меняется в 4-5 раз в период основного ускорения (рис. 4, б). Для одного КВМ не удалось определить его геометрические характеристики.

4. Показано, что на начальной стадии движение пяти из шести рассмотренных КВМ не является прямолинейным. Отклонения направлений движения КВМ в период их основного ускорения от первоначального оказались в пределах 12° .

5. Изменение со временем отношения поперечного размера КВМ к его продольному размеру для

трех KBM возрастает в период их основного ускорения. Это свидетельствует об отсутствии автономности движения этих KBM в период ускорения (рис. 4, в). Для двух событий это отношение меняется слабо, но период наблюдений мал и недостаточен для выводов.

Мы благодарим команды PROBA-2, LASCO, GOES и RHESSI за возможность свободно использовать их данные, Л. Кашапову за помощь в обработке данных RHESSI, В. Гречнева за полезные обсуждения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Marićić D., Vršnak B., Roša D. // Solar Phys. 2009. V. 260, P. 177–189.
- Temmer M., Veronig A.M., Vršnak B., et al. // Astrophys. J. 2008. V. 673. P. 95–98.
- Temmer M., Veronig A.M., Kontar E.P., et al. // Ibid. 2010. V. 712. P. 1410–1420.
- Zhang J., Dere K.P. // Ibid. 2006. V. 649, P. 1100–1109.

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск