

УДК 523-98

ИССЛЕДОВАНИЕ НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ ДВИЖЕНИЯ КОРОНАЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ МАССЫ ТИПА ГАЛО

Ю.С. Загайнова, В.Г. Файнштейн

EXAMINING THE INITIAL PHASE OF MOTION OF HALO CORONAL MASS EJECTIONS

Yu.S. Zagaynova, V.G. Fainshtein

По данным GOES/SXI исследована начальная стадия движения шести корональных выбросов массы типа гало (ГКВМ) и прослежено движение этих ГКВМ в поле зрения LASCO C2 и C3 обсерватории SOHO.

GOES/SXI data have been used to study the initial phase of motion of six halo coronal mass ejections (HCME) and to trace their motion in the LASCO C2 and C3 SOHO observatory fields of view.

Введение

Для выяснения механизмов формирования корональных выбросов массы (КВМ) необходимо изучить их начальную стадию движения по данным с высоким временным и пространственным разрешением. К настоящему времени выполнен ряд таких исследований с использованием различных инструментов (см. [Zhang, Dere, 2006; Temmer et al., 2008, 2010; Maričić et al., 2009] и цитируемую в этих работах литературу). Однако в большинстве выполненных ранее работ исследовалось движение КВМ, наблюдаемых на лимбе, что не позволяет точно указать местоположение источника КВМ и связать свойства КВМ с характеристиками структур и явлений в окрестности места возникновения КВМ. Исследование свойств выбросов, источники которых находятся на видимом диске Солнца, например КВМ типа гало (ГКВМ) [Howard et al., 1982], лишено указанных недостатков. В частности, можно установить вза-

имное расположение источника ГКВМ и связанной с ним солнечной вспышки, изучить структуру и динамику магнитного поля в месте возникновения выброса и т. д. Актуальность таких исследований заключается еще и в том, что воздействие именно ГКВМ на магнитосферу Земли приводит к самым сильным геомагнитным бурям.

В настоящей работе исследована начальная стадия движения шести ГКВМ из группы самых быстрых выбросов в солнечном цикле 23 со скоростью $V > 1500$ км/с по данным телескопа Solar X-ray Imager (SXI) [SXI-archive], установленного на борту космического аппарата GOES-12; временное разрешение инструмента составляет ~1 мин. Для изучения движения ГКВМ на расстояниях более $2R_{\odot}$ использовались данные коронографов LASCO C2 и C3 обсерватории SOHO [SOHO LASCO CME CATALOG] (здесь R_{\odot} – радиус Солнца).

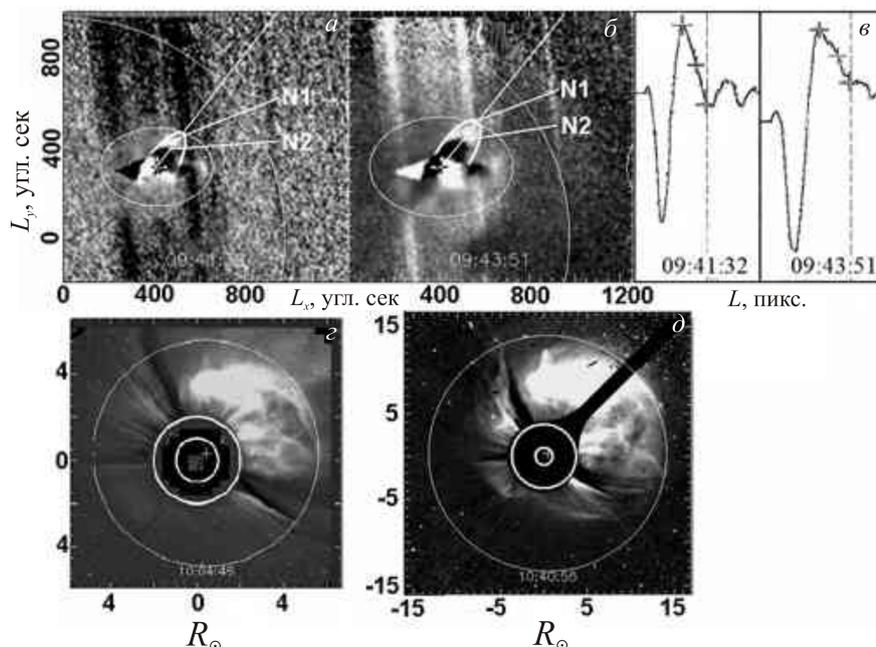


Рис. 1. ГКВМ 17.01.2005 г.: SXI-изображения, полученные делением друг на друга яркостей двух последовательных по времени изображений, N1 – светлая петлеобразная структура, N2 – темная; также указаны направления, проходящие через вершины данных петлеобразных структур, используемые для получения сканов яркости (а, б); фрагменты сканов яркости вдоль выделенных на рис. 1, а, б направлений в указанные моменты наблюдения ГКВМ; крестиками отмечены вершина, середина и основание N1 (в); изображение ГКВМ в поле зрения LASCO C2 и C3 (г, д). Овалами и окружностями на панелях а–д отмечены границы тела ГКВМ, приблизительно совпадающие с основанием фронта ГКВМ.

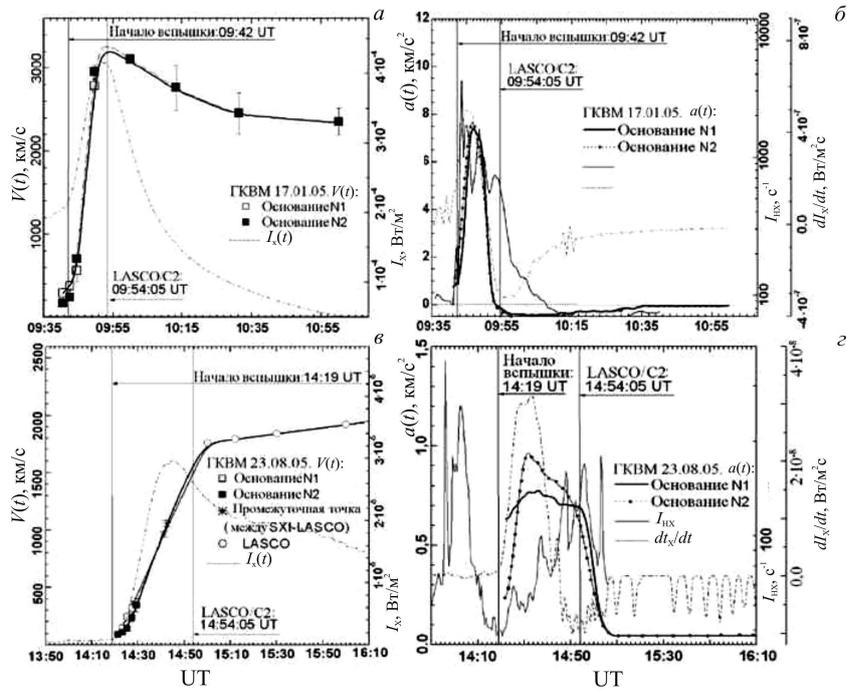


Рис. 2. Скорость ГКВМ 17.01.2005 г. $V(t)$ в сравнении с интенсивностью мягкого рентгеновского излучения $I_X(t)$ (а); Символами указаны значения скорости, полученные по светлым (N1) и по темным (N2) петлеобразным структурам; максимальная скорость на рисунке – промежуточная скорость, полученная по данным SXI и LASCO. Сравнение ускорения ГКВМ $a(t)$ с производной интенсивности мягкого рентгеновского излучения $dI_X(t)/dt$ и интенсивностью жесткого рентгеновского излучения $I_{HX}(t)$ в диапазоне энергий 50–100 кэВ (б); аналогичные зависимости $V(t)$, $I_X(t)$, $a(t)$ и $I_{HX}(t)$ для ГКВМ 23.08.2005 г. Время вспышки определялось из производной мягкого рентгена (в, з).

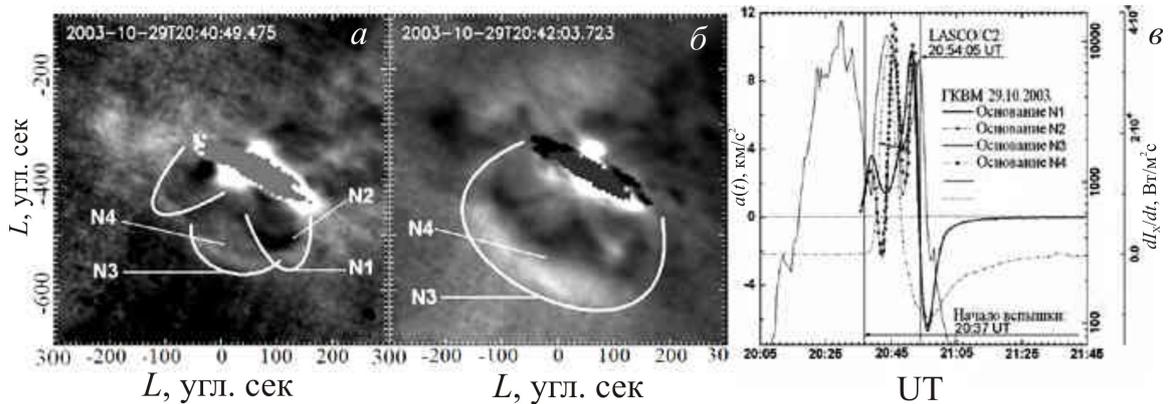


Рис. 3. ГКВМ 29.10.2003 г.: SXI-изображения, полученные делением друг на друга яркостей двух последовательных по времени изображений (а, б); сравнение ускорения ГКВМ $a(t)$ с производной интенсивности мягкого рентгеновского излучения $dI_X(t)/dt$ и интенсивностью жесткого рентгеновского излучения $I_{HX}(t)$ в диапазоне энергий 50–100 кэВ (в).

Данные и методы исследования

Исследованы свойства ГКВМ на начальной стадии их движения, зарегистрированных 17.01.2005 г. (рис. 1) и 15.01.2005 г. (два события) в активной области (АО) 10720, 23.08.2005 г. (рис. 2) и 22.08.2005 г. в АО 10798, 29.10.2003 г. (рис. 3) в АО 10492. Наблюдавшиеся ГКВМ в поле зрения SXI видны как одиночные петлеобразные структуры. Исключением является событие от 29.10.2003 г., когда ГКВМ на первом этапе регистрируется в виде аркады движущихся поступательно петель (по данным TRACE [TRACE DATA CENTER] и EIT/SOHO [SOHO EIT Catalog Interface]) или трех петель (по данным SXI), а на втором этапе наблюдается в виде одной петлеобразной структуры с широким фронтом и угловыми размерами, сопоставимыми с размерами аркады (рис. 3). Анализ данных SXI предшествовала их предварительная об-

работка, включавшая исправление изображений за плоское поле, устранение высокочастотного шума на изображениях, совмещение изображений и др. Скорости ГКВМ в каждый момент времени находились с использованием сканов яркости вдоль выделенных направлений, проходящих через вершины петлеобразных структур (рис. 1, а, б). Для этого из положений фронта ГКВМ $L_i(t)$, найденных по данным SXI, по формуле $V_i = (L_{i+1} - L_i) / (t_{i+1} - t_i)$ рассчитывались скорости фронта ГКВМ. Здесь L_i – расстояние, пройденное фронтом КВМ вдоль криволинейной траектории в момент времени t_i . При этом полагалось, что значение скорости V_i достигается в момент $t_{Vi} = (t_{i+1} + t_i) / 2$. Значения V_i аппроксимировались бисплайнами (B-splines) 3-го порядка с учетом погрешности определения V_i ; в результате получалась гладкая функция $V(t)$. Ускорение ГКВМ $a(t)$ находилось из соотношения

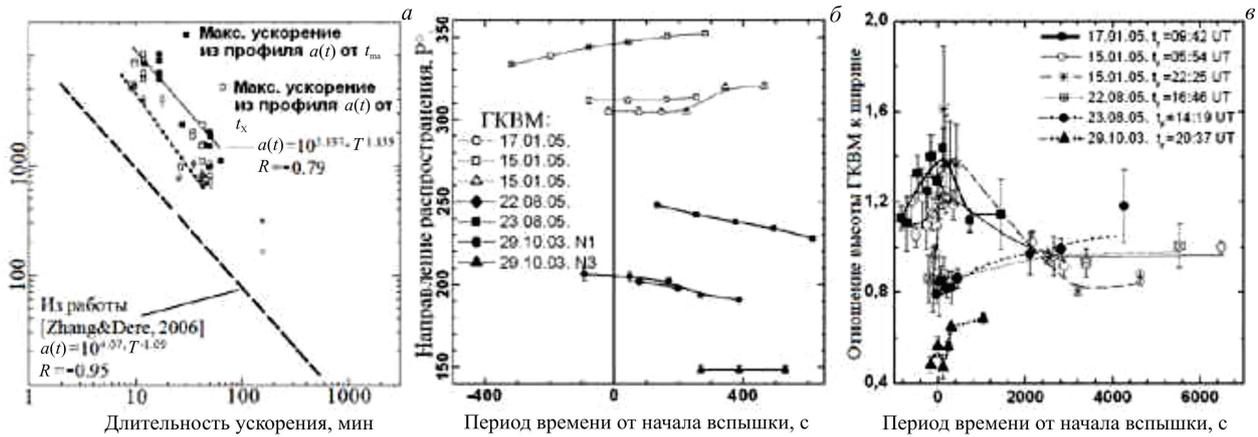


Рис. 4. Зависимость максимума ускорения от длительности ускорения $t_{ма}$ и t_x (а). Сплошной линией с точками показана линия регрессии $a(t)=10^{5.17} t_{ма}^{-1.45}$ для значений ускорения ГКВМ $V_{max}/t_{ма}$ и V_{max}/t_x ; траектории ГКВМ в картинной плоскости (б); изменение со временем отношения высоты ГКВМ к его ширине (в).

$a(t)=dV(t)/dt$. Для нахождения основного ускорения использовался метод, согласно которому профиль ускорения $a(t)$ задается аналитическими функциями на последовательных интервалах времени с плавной сшивкой функций на границах интервалов. Конкретный вид этих функций подбирался из условия наилучшего согласования $\int a(t)dt$ со значениями скорости $V_i(t_{Vi})$, а $\int \int a(t)dt dt'$ – со значениями L_i . Далее находилось ускорение ГКВМ $a(t)=dV(t)/dt$. Для расчета $V(t)$ в поле зрения коронографов LASCO положение фронта КВМ определялось из каталога [SOHO LASCO CME CATALOG]. Временной профиль скорости ГКВМ $V(t)$ сравнивался с интенсивностью мягкого рентгеновского излучения $I_X(t)$ в диапазоне длин волн 1–8 Å по данным GOES-10 [GOES-archive], а профиль $a(t)$ – с интенсивностью жесткого рентгеновского излучения в диапазоне энергий 50–100 кэВ, зарегистрированного RHESSI [RHESSI], а также с профилем $dL_X(t)/dt$.

Результаты

Основные результаты работы можно сформулировать следующим образом:

1. Показано, что пять из шести рассмотренных ГКВМ начинают поступательное движение с основным ускорением до начала связанной с ГКВМ вспышки; один ГКВМ 22.08.2005 г. – либо в момент начала вспышки, либо спустя ~30 с после ее начала.
2. Пять из шести рассмотренных ГКВМ в течение периода от нескольких минут до нескольких десятков минут до начала поступательного движения видны как одиночные петлеобразные структуры. Исключением является ГКВМ 29.10.2003 г. (см. выше).
3. Установлено, что характер изменения скорости $V(t)$ и ускорения $a(t)$ для ГКВМ, возникших в одной АО, может быть подобен. Так, для ГКВМ 17.01.2005 г. $V(t)$ достигает максимального значения, затем резко падает в течение короткого времени и далее уменьшается по закону, характерному для автомодельного расширения. На расстояниях больших $2R_{\odot}$ наблюдается слабое отклонение от автомодельного расширения, обусловленное, по-видимому, влиянием аэродинамического торможения ГКВМ или взаимодействием данного ГКВМ с предшествующим КВМ. Выход на автомодельное расширение

происходит примерно в середине временного интервала, в течение которого регистрируется жесткое рентгеновское излучение (рис. 2, а, б). Близкими свойствами обладают два ГКВМ, наблюдаемых 15.01.2005 г. в этой же АО. Другой характер изменения $V(t)$ имеют ГКВМ, последовательно наблюдаемые 22 и 23.08.2005 г. вблизи лимба в одной АО 10798 (рис. 2, в, г). Для них $V(t)$ непрерывно возрастает, длительность основного ускорения приблизительно равна длительности жесткого рентгеновского излучения.

4. Время основного ускорения ГКВМ близко ко времени нарастания интенсивности мягкого рентгеновского излучения связанной с ГКВМ вспышки. Максимальное измеренное ускорение ГКВМ принимает значения $a_{max} \approx 0.9 \div 10 \text{ км/с}^2$ и близко величине, получаемой делением максимальной скорости ГКВМ V_{max} на время нарастания интенсивности рентгеновского излучения t_x . Подтвержден вывод работы [Zhang, Dere, 2006] о существовании обратной корреляции между ускорением ГКВМ $V_{max}/t_{ма}$, $t_{ма}$ – измеренная длительность основного ускорения, а также V_{max}/t_x и длительностью ускорения $t_{ма}$, t_x (рис. 4, а). В нашей работе эта зависимость получена для значений V_{max} и a_{max} , которые существенно больше, чем в работе [Zhang, Dere, 2006].

5. На начальном этапе траектории ГКВМ являются криволинейными и отклоняются от экватора; причем ГКВМ, возникшие в северном полушарии Солнца, отклоняются от экватора к северному полюсу, а ГКВМ, возникшие в южном полушарии, – к южному (рис. 4, б).

6. Исследовано изменение углового размера ГКВМ со временем. При этом вершина угла, определяющего размер выброса, помещается в центр солнечного диска. Показано, что угловой размер всех рассмотренных ГКВМ резко (в несколько раз) увеличивается со временем в первые минуты движения, а в поле зрения LASCO C2 и C3 изменяется слабо.

7. Показано, что в первые минуты движения ГКВМ отношение продольного размера к поперечному заметно изменяется со временем, а после выхода ГКВМ в поле зрения коронографа LASCO C2 это отношение изменяется слабо, что, возможно, указывает на установление автомодельного режима расширения ГКВМ (рис. 4, в).

8. Установлено, что ширина фронта всех рассмотренных ГКВМ в общем случае немонотонно возрастает со временем.

Авторы благодарны командам GOES и GOES-12/SXI, RHESSI, SOHO/EIT и SOHO/LASCO за возможность свободного использования данные этих инструментов. Авторы благодарны В.В. Гречневу за полезные обсуждения результатов работы и за консультации по методам обработки данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Howard R.A., Michels D.J., Sheeley Jr. N.R., Koomen M.J. The observation of a coronal transient directed at Earth // *Astrophys. J.* 1982. V. 263. P. L101–L104.

Maričić D., Vršnak B., Roza D. Relative kinematics of the leading edge and the prominence in coronal mass ejections // *Solar Phys.* 2009. V. 260. P. 177–189.

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. L95–L98.

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.

GOES-archive: <http://goes.ngdc.noaa.gov/data/avg/>.

RHESSI: <http://sprg.ssl.berkeley.edu/~tohban/browser/>.

SOHO EIT Catalog Interface: <http://umbra.nascom.nasa.gov/eit/eit-catalog.html>.

SOHO LASCO CME CATALOG: http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/.

SXI-archive: <http://satdat.ngdc.noaa.gov/sxi/archive/>.

TRACE DATA CENTER: http://trace.lmsal.com/trace_cat.html.

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск