

УДК 523.98.

## Возникновение и движение быстрых корональных выбросов массы типа “галло”, не связанных с эруптивными волокнами

Ю. С. Загайнова<sup>1</sup>, В. Г. Файнштейн<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ИЗМИРАН им. Н.В. Пушкова, г. Москва, Троицк, Россия  
*yuliazag@izmiran.ru*

<sup>2</sup> ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия  
*vfain@iszf.irk.ru*

Поступила в редакцию 8 октября 2013 г.

**Аннотация.** По данным GOES/SXI, SOHO/EIT, TRACE, MarkIV-coronameter и LASCO исследовано формирование и кинематика движения шести быстрых корональных выбросов массы типа “галло” (ГКВМ), не связанных с эрупцией солнечных волокон. Сделан вывод о существовании двух классов корональных выбросов массы (КВМ), различающихся типом временного профиля скорости  $V(t)$ ; характер профиля  $V(t)$  зависит от свойств активной области (АО), в которой был сформирован выброс. Показано, что гомологичные ГКВМ, т. е. возникшие в разное время в одной и той же АО, принадлежат к одному и тому же классу профиля  $V(t)$ . Все исследованные выбросы наблюдались в поле зрения SOHO/EIT в  $\lambda 195 \text{ \AA}$  как эмиссионные петли (в одном из случаев – как совокупность петель) за несколько часов до их регистрации GOES/SXI. Предполагается, что ГКВМ сформировались вследствие нарушения равновесия этих эмиссионных петель. Установлены зависимости между амплитудой и длительностью ускорения ГКВМ, а также соотношение этих параметров с длительностью нарастания интенсивности мягкого рентгеновского излучения.

OCCURRENCE AND PROPAGATION OF FAST HALO CORONAL MASS EJECTIONS UNRELATED TO ERUPTIVE FILAMENTS, *by Yu.S. Zagainova, V.G. Fainshtein.* We used GOES/SXI, SOHO/EIT, TRACE, MarkIV-coronameter and SOHO/LASCO data to study the formation and movement of 6 fast halo coronal mass ejections (HCMEs), unrelated to eruptive filaments. We have drawn a conclusion about the existence of two CME types having different time profiles of the coronal mass ejection velocity. Types of time profiles are determined by features of the active region (AR), in which CME occurs. HCMEs occurring in one and the same AR at different time (homologous CMEs) have the same time profiles. Several hours before being recorded by the GOES/SXI, all CMEs under study are observed in the SOHO/EIT field-of-view, in  $\lambda 195 \text{ \AA}$ , as emission loops (in one case – as a complex of loops). We have drawn a conclusion that CME occurs due to the imbalance in these emission loops. We have established the dependence of amplitude on duration of the HCME main acceleration.

**Ключевые слова:** Солнце, корональный выброс массы, солнечная вспышка

---

## 1 Введение

К настоящему времени изучены различные аспекты формирования и начальной фазы движения корональных выбросов массы (КВМ) (см. Галлахер и др., 2003; Жанг, Дерс, 2006; Теммер и др., 2008, 2010; Бейн и др., 2012; Патсоуракос и др., 2010, 2013; Файнштейн, Егоров, 2013; Бак-Слесличка и др., 2013 и цитированную в этих работах литературу). Тем не менее многие вопросы, относящиеся к возникновению и последующему движению КВМ, остаются невыясненными. Один из таких вопросов касается особенностей механизмов генерации и движения КВМ двух типов: связанных и не связанных с эруптивными волокнами (ЭВ).

Большинство КВМ считается связанными с ЭВ (Мунро и др., 1979). Однако многие выбросы массы не удается связать с ЭВ (Бейн и др., 2012). Можно предположить, что механизмы формирования таких КВМ отличаются от механизмов генерации КВМ, связанных с ЭВ. В работах (Гречнев и др., 2013; Файнштейн, Егоров, 2013) сделан вывод, что ЭВ являются триггерами формирования исследованных КВМ. С другой стороны, Патсоуракос и др. (2013) показали, что за  $\approx 7$  часов до появления КВМ, не связанного с ЭВ, возникает корональный магнитный жгут, последующая дестабилизация которого приводит к его выбросу, т. е. жгут превращается в КВМ.

Особый интерес представляет изучение закономерностей возникновения и движения быстрых КВМ (в данной работе быстрыми считаются КВМ с линейной скоростью в поле зрения LASCO  $V > 1500$  км/с). Известно, что доля быстрых КВМ существенно выше (Гопалсвами и др., 2010) среди корональных выбросов массы типа гало (ГКВМ; Говард и др., 1982). Быстрые ГКВМ часто оказываются геоэффективными (Гопалсвами и др., 2007). ГКВМ являются довольно удобными объектами для изучения механизмов формирования выбросов массы, т. к. в случае расположения их источников относительно близко к центру солнечного диска появляется возможность изучить многие явления, которые происходят в месте возникновения КВМ.

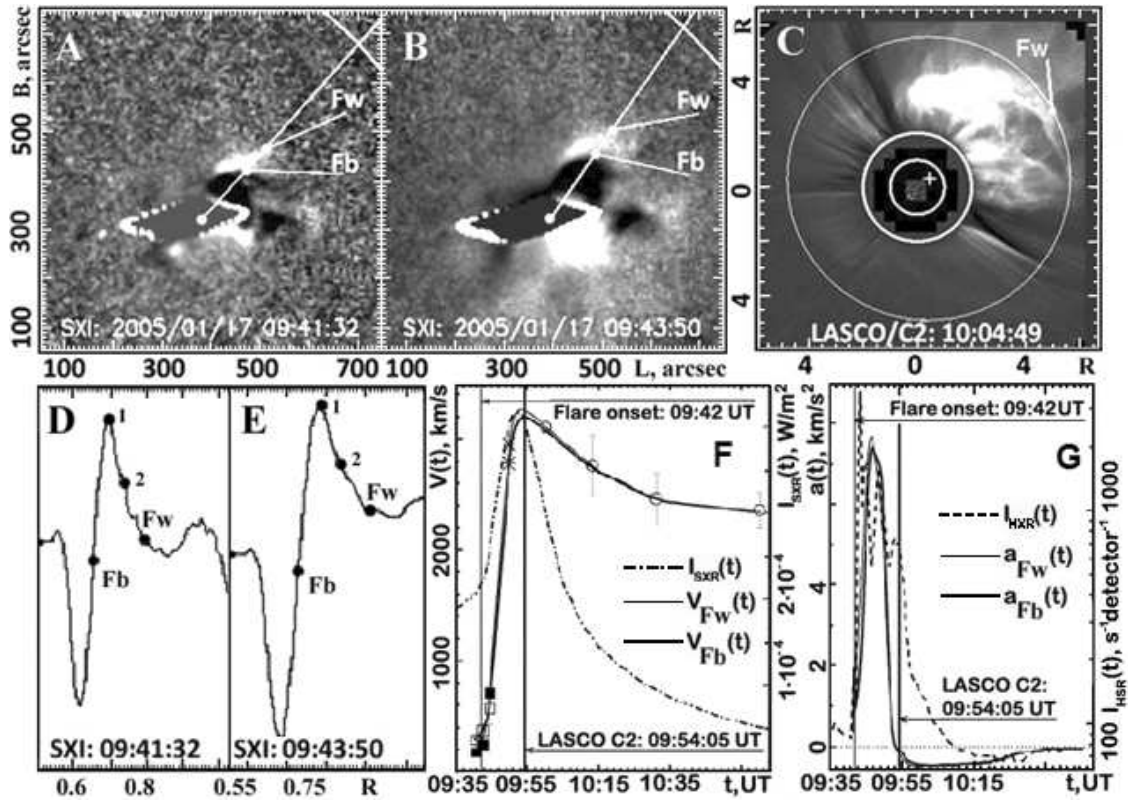
Цель настоящей работы – получить сведения о закономерностях формирования и движения быстрых ГКВМ, не связанных с ЭВ, по данным телескопов SOHO/EIT и GOES-12/SXI (Хилл и др., 2005), объединенными с данными SOHO/LASCO и, для одного события, с данными MarkIV (MLSO).

## 2 Данные и методы их анализа

Были изучены свойства шести ГКВМ со скоростью  $V > 1500$  км/с, зарегистрированных в поле зрения SOHO/LASCO 29.10.2003 (20:54:05 UT); 15.01.2005 (06:30:05 UT), 15.01.2005 (23:06:50 UT), 17.01.2005 (09:54:05 UT), 22.08.2005 (17:30:05 UT) и 23.08.2005 (14:54:05 UT). В скобках указано время первой регистрации выброса массы в поле зрения LASCO C2 по данным каталога [http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\\_list/HALO/halo.html](http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/HALO/halo.html). Отбор событий осуществлен по двум критериям: по величине “линейной” скорости ГКВМ и с учетом требования, чтобы траектория наблюдаемого выброса в поле зрения SXI не была сильно искривленной. Для надежного выделения ГКВМ в поле зрения SXI проводилась предварительная обработка изображений, включающая в себя исправление SXI изображений за плоское поле, поворот исходного изображения Солнца, совмещение ближайших по времени изображений, фильтрация данных методом скользящего среднего для устранения высокочастотного шума и др. Временное разрешение телескопа SXI  $\approx 60$  сек., пространственное разрешение этого инструмента  $\approx 5$  угловых секунд на пиксель.

Для надежного отождествления ГКВМ использовались отношения ближайших по времени изображений SXI. Для нахождения положения, скорости и ускорения фронта ГКВМ в зависимости от времени были построены распределения яркости, рис. 1 (D) и (E), вдоль оси ГКВМ. При нахождении кинематических характеристик ГКВМ мы использовали положения снования фронта выброса, рис. 1 (D), (E). Для нахождения скорости фронта ГКВМ  $V_{i(i+1)}(t)$  с учетом отклонения направления движения выброса от прямолинейной траектории (где  $i$  и  $(i+1)$  – номера изображений, полученных в моменты времени  $t_i$  и  $t_{i+1}$ ) были определены расстояния  $dL_{i(i+1)}$  между положениями основания фронта ГКВМ в плоскости неба в моменты времени  $t_i$  и  $t_{i+1}$ . Скорость выброса на каждом участке траектории в момент времени  $(t_i + t_{i+1})/2$  находится из соотношения

$V_{i(i+1)} \equiv V((t_i + t_{i+1})/2) = dL_{i(i+1)}/(t_{i+1} - t_i)$ . При построении графиков  $V_{i(i+1)}(t)$  мы также рассчитывали промежуточные скорости, используя последнее положение фронта ГКВМ в поле зрения SXI и первое положение фронта выброса по данным LASCO C2. Для события 29.10.2003 на профиль  $V_{i(i+1)}(t)$  добавлены значения скорости с учетом положения фронта ГКВМ в поле зрения MarkIV K-coronameter (MLSO), <http://mlso.hao.ucar.edu/>.



**Рис. 1.** (A), (B) – изображения NOAA 10720, *Fw* – фронт “белой” петлеобразной структуры КВМ, *Fb* – фронт “темной” структуры, прямая линия – направление сканирования яркости из положения центра связанной с выбросом вспышки, *L*, *B* – расстояния от центра солнечного диска; (C) – изображения КВМ по данным LASCO C2, *R* – расстояние в радиусах Солнца  $R_0$ , белые внутренние окружности очерчивают границы диска Солнца и искусственной луны коронографа C2, символом “+” отмечено место источника выброса на диске Солнца; (D), (E) – распределения яркости вдоль направления движения выброса, цифрами 1 и 2 отмечены вершина и середина фронта “белой” петлеобразной структуры, отождествляемой с ГКВМ, *Fw* – основание фронта ГКВМ (“белой” структуры), *Fb* – вершины фронта “черной” структуры (значения яркости не приводятся); (F) – профиль скорости ГКВМ (отдельно для “белой” и “черной” петлеобразной структуры) в сравнении с профилем  $I_{\text{SXR}}(t)$ , символами “□” показаны значения скорости оснований “белых” структур, “■” – скорости “черных” структур, “○” – скорости ГКВМ по данным LASCO, “\*” – промежуточные значения скорости, полученные по данным SXI и LASCO C2 для “белых” и “черных” петлеобразных структур; (G) – ускорение  $a(t)$  в сравнении с  $I_{\text{HXR}}(t)$  в диапазоне 50–100 кэВ по данным RHESSI

Методом интерполяции B-сплайнами и совокупности значений скорости  $V((t_i + t_{i+1})/2)$  с учетом погрешности их измерений находили непрерывный профиль  $V(t)$ . Ускорение  $a(t)$  получено из соотношения  $a(t) = dV(t)/dt$ . Минимальная погрешность измерения скорости  $\delta V_{\text{min}}$  вычислялась

по формуле  $\delta V_{\min} = 2\delta L / (t_{i+1} - t_i)$  (Санмугараджю и др., 2010), где  $\delta L$  – пространственное разрешение телескопа. В рассматриваемых нами случаях  $\Delta V$  больше  $\delta V_{\min}$ , поэтому согласно работе (Галахер и др., 2003) на расстоянии  $R < 5R_o$  ( $R_o$  – радиус Солнца) погрешность скорости выброса массы определяется из  $\Delta V = 10P / (t_{i+1} - t_i)$ , где  $P$  – размер пикселя в км. На расстояниях  $R > 5R_o$  точность нахождения положения фронта КВМ полагалась равной  $0.5R_o$  (Санмугараджю и др., 2010).

Для выделения на этапе возникновения ГКВМ петлеобразных структур, которые в дальнейшем сформируют эруптивную основу ГКВМ, использовались данные телескопа SOHO/EIT и TRACE. Чтобы выявить в области места возникновения ГКВМ эруптивные волокна, использовались наблюдения Солнца в H $\alpha$  [http://swrl.njit.edu/ghn\\_web/](http://swrl.njit.edu/ghn_web/), [http://mlso.hao.ucar.edu/mlso\\_data\\_PICS\\_2005.html](http://mlso.hao.ucar.edu/mlso_data_PICS_2005.html) и <ftp://ftp.ips.gov.au/wdc-data/solar/data/culgoora/>, а также данные инструментов в  $\lambda$  304 Å.

### 3 Результаты

#### 3.1 Описание событий, формирование и кинематика ГКВМ и их связь со вспышками

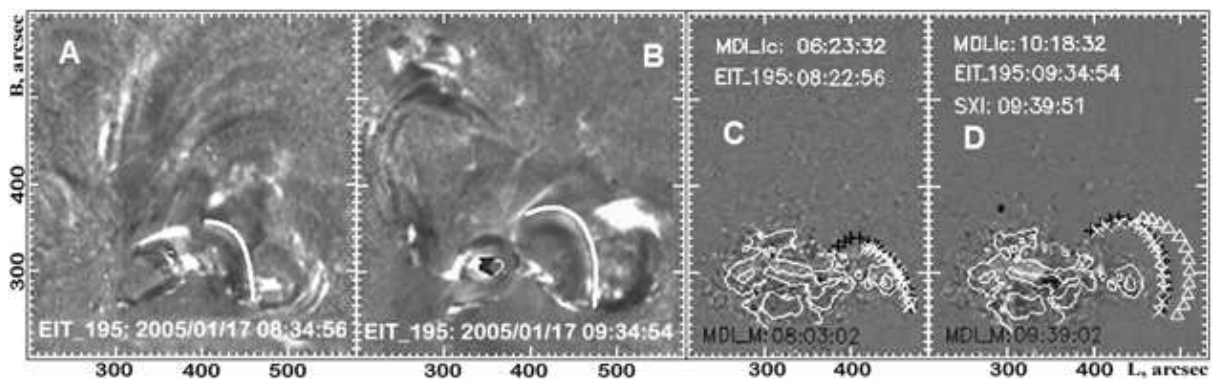
Ниже наиболее подробно обсуждаются характеристики трех из шести рассмотренных событий, принципиально отличающихся друг от друга либо местоположением источника ГКВМ, либо особенностями формирования или кинематикой выброса и т. д.

**Событие 17 января 2005 г.** ГКВМ возник в активной области (АО) NOAA 10720; линейная скорость выброса массы  $V = 2547$  км/с. ГКВМ был связан с мощной солнечной вспышкой X3.8/3B с гелиографическими координатами N15W25. Заметим, что этот ГКВМ уже анализировался в работе (Теммер и др., 2008), однако нам удалось получить для этого события новые результаты. Так же, как и Теммер с соавторами (2008), нам не удалось обнаружить связанное с этим событием эруптивное волокно.

На рис. 1 (A), (B) показаны в различные моменты времени изображения “белой” петлеобразной структуры, которую мы считаем корональным выбросом массы; фронт петлеобразной структуры по данным SXI и LASCO C2 обозначен  $Fw$  (см. рис. 1 (C)). Темная область ниже “белой” петлеобразной структуры, отмеченная символом  $Fb$ , соответствует положению “белой” петлеобразной структуры в предыдущий момент времени. На рис. 1 (F) приведен временной профиль скорости выброса  $V(t)$ , полученный по объединенным данным SXI и LASCO. Обратим внимание на характер изменения  $V(t)$  со временем: скорость ГКВМ  $V(t)$  быстро достигает максимума, а затем в течение периода времени,  $\approx 40$  мин., уменьшается на  $\approx 800$  км/с, и далее продолжает уменьшаться со временем, но существенно медленнее. На рис. 1 (G) показан профиль ускорения ГКВМ  $a(t)$ , который характеризуется колоколообразной формой с участками быстрого роста и быстрого спада значений ускорения. В поле зрения LASCO C2 и C3 ускорение становится отрицательным и со временем уменьшается по модулю. Такое поведение качественно согласуется с представлением об автоматическом расширении выброса в этот период (Уралов и др., 2005). На рис. 1 (F) профиль скорости ГКВМ  $V(t)$  сопоставлен с зависимостью от времени интенсивности мягкого рентгеновского излучения  $I_{SXR}(t)$  из области связанной с ГКВМ вспышки. На рис. 1(G) временной профиль ускорения ГКВМ  $a(t)$  сравнивается с зависимостью от времени интенсивности жесткого рентгеновского излучения  $I_{HXR}(t)$  в диапазоне энергии фотонов 50–100 кэВ. Из рис. 1 (F) и (G) следует: i) поступательное движение ГКВМ начинается за несколько минут до начала связанной с выбросом вспышки; ii) изменение со временем  $V(t)$  синхронизовано с изменением  $I_{SXR}(t)$  до момента времени достижения максимумов этими параметрами; iii) длительность основного ускорения ГКВМ меньше, чем длительность  $I_{HXR}(t)$ . Последнее означает, что длительность основного ускорения ГКВМ меньше длительности ускорения нетепловых электронов.

Данные SXI не позволяют выяснить, каким образом сформировалась исследуемая нами петлеобразная структура. Некоторые сведения об этом удалось получить из изображений Солнца по данным SOHO/EIT в  $\lambda = 195$  Å. Оказалось, что широкая эмиссионная петлеобразная структура наблюдалась задолго до момента ее регистрации в поле зрения SXI. На рис. 2 (A,B) на обработанных

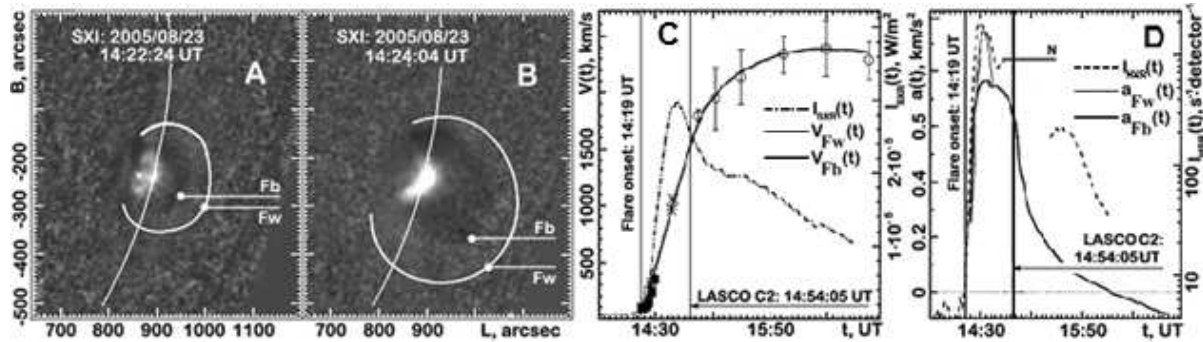
изображениях телескопа EIT наблюдается эмиссионная петля, верхняя граница которой очерчена белой линией. Эта петля нанесена также на магнитограммы на рис. 2 (C,D), где она отмечена крестиками. Мы считаем, что именно эта широкая петлеобразная структура в результате нарушения равновесия стала основой будущего ГКВМ, и именно ее удалось зарегистрировать в поле зрения SXI. Доказательством этому служит близость по месту расположения и по форме “белой” петлеобразной структуры, наблюдаемой EIT и SXI в разных диапазонах длин волн в наиболее близкие моменты времени, рис. 2 (D). Анализ наблюдений в H $\alpha$  и 304 Å показал, что эта эмиссионная петля не является нагретым солнечным волокном. Выявленная широкая петлеобразная структура начала медленное поступательное движение еще до момента первой регистрации ГКВМ в поле зрения SXI. Оказалось, что эта петля является менее яркой и более широкой в поперечном разрезе, чем окружающие ее корональные петли, наблюдаемые в эмиссии в исследуемой АО.



**Рис. 2.** (A) – изображение петлеобразной структуры, отождествляемой с КВМ (внешняя граница структуры обведена белой линией); (B) – изображение петлеобразной структуры в момент начала поступательного движения и близкий к моменту времени, когда выброс был зарегистрирован по данным SXI; (C) и (D) – магнитограммы, полученные делением соседних по времени магнитограмм телескопа MDI (моменты времени, соответствующие изображениям, указаны напротив *MDI\_1c*), поверх магнитограмм белыми линиями нанесены границы тени и полутени солнечных пятен, полученные из изображений Солнца в континууме (моменты времени, соответствующие изображениям, указаны напротив *MDI\_L*). Символами нанесены положения петлеобразных структур в различных длинах волн и в разные моменты времени: “+” – внешняя граница петлеобразной структуры на исходных изображениях EIT в  $\lambda$  195 Å; “x” – граница петлеобразной структуры на кадрах, полученных делением двух близких по времени изображений EIT, “Δ” – граница “белой” петлеобразной структуры по данным SXI

**Событие 23 августа 2005 г.** На рис. 3 (A), (B) для двух моментов времени показан выброс массы в поле зрения SXI; исследуемый выброс только в поле зрения LASCO C3 был отождествлен как “гало”. Данный ГКВМ возник в АО NOAA 10798 и был связан со вспышкой рентгеновского класса M2.7 с координатами S14W90. Оказалось, что кинематика движения данного выброса существенно отличается от кинематики ГКВМ от 17.01.2005, рис. 3 (C), (D). В этом случае после периода относительно быстрого нарастания в течение примерно 38 минут, скорость выброса массы продолжает увеличиваться, но медленно, и после достижения максимального значения начинает уменьшаться, рис. 3 (C). Здесь мы условно за время окончания основного ускорения ГКВМ приняли момент выхода выброса массы в поле зрения LASCO C2. Амплитуда ускорения этого выброса оказалась на порядок меньше, чем для ГКВМ от 17.01.2005. Профиль ускорения ГКВМ от 23.08.2005, рис. 3 (D),

также заметно отличается от зависимости  $a(t)$  выброса от 17.01.2005. Тем не менее, учитывая наличие относительно быстрого нарастания ускорения ГКВМ до выхода в поле зрения коронографа LASCO C2, этот ГКВМ тоже можно отнести к импульсным событиям.



**Рис. 3.** (A), (B) – изображение NOAA 10798 с иллюстрацией ГКВМ (внешняя граница выброса очерчена белой линией); (C), (D) – обозначения те же, что и на рис. 1 (F) и (G), но для события 23.08.2005, значения  $I_{HXR}(t)$  приведены в диапазоне 12–25 кэВ

Поступательное движение этого ГКВМ началось практически одновременно с началом вспышки. Синхронность между изменением со временем скорости данного выброса и интенсивности рентгеновского излучения оказалась нарушенной: в период основного ускорения выброса относительная скорость нарастания  $V(t)$  заметно меньше скорости увеличения  $I_{SXR}(t)$ . Максимум  $V(t)$  достигается на  $\approx 104$  минуты позже момента максимума  $I_{SXR}(t)$ . Максимум ускорения  $a_{MAX}$  оказался близок по времени к моменту достижения максимума  $dI_{SXR}(t)/dt$  и интенсивностью жесткого рентгеновского излучения  $I_{HXR}(t)$  (аналогичная ситуация была и в предыдущем ГКВМ-событии от 17.01.2005), а нарастание  $a(t)$  синхронизовано с увеличением  $I_{HXR}(t)$ .

В этой же АО задолго до начала регистрации ГКВМ в поле зрения SXI от 23.08.2005 по данным EIT также наблюдалась эмиссионная структура, которую мы отождествили с выбросом, рис. 4 (A) и (B). Выявленная петлеобразная структура полностью видна только на начальном этапе поступательного движения и когда она целиком проецируется на диск Солнца. Нам повезло, для этого события удалось одновременно выявить выброс в поле зрения SXI и связанную широкую петлеобразную структуру на изображении EIT, см. рис. 4 (C). Это убедительно доказывает, что КВМ, наблюдаемый в поле зрения SXI, и эмиссионная петлеобразная структура, выделенная на изображениях EIT – одна и та же структура.

**Событие 29 октября 2003 г.** Корональный выброс массы от 29.10.2003 возник в АО NOAA 10486 и сопровождался мощной вспышкой рентгеновского и оптического классов X10/2B с координатами S15W02. Особенностью этого события является то, что нам представилась возможность по данным SXI увидеть один из начальных этапов формирования ГКВМ. Формирование выброса начинается с поступательного движения нескольких близкорасположенных друг к другу петлеобразных структур (см. рис. 5 (A)). Возможно, что наблюдаемые близкорасположенные структуры являются проекцией на диск Солнца не изолированных петлеобразных структур, а аркады петель. Через некоторое время после начала поступательного движения эти петлеобразные структуры, как видно на рис. 5 (B), формируют единую структуру выброса с широким фронтом – сформировавшийся КВМ. Исследуемый выброс уже в поле зрения LASCO C3 наблюдался как “гало”. Также этот выброс массы был зарегистрирован MLSO MarkIV K-coronameter. Временной профиль скорости  $V(t)$  ГКВМ похож на соответствующий профиль скорости выброса от 17.01.2005. Однако по изображениям “черных”

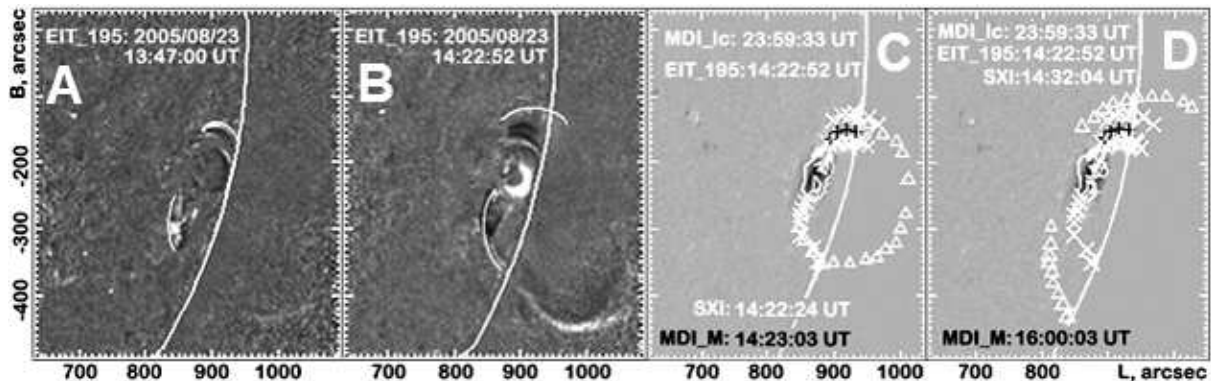
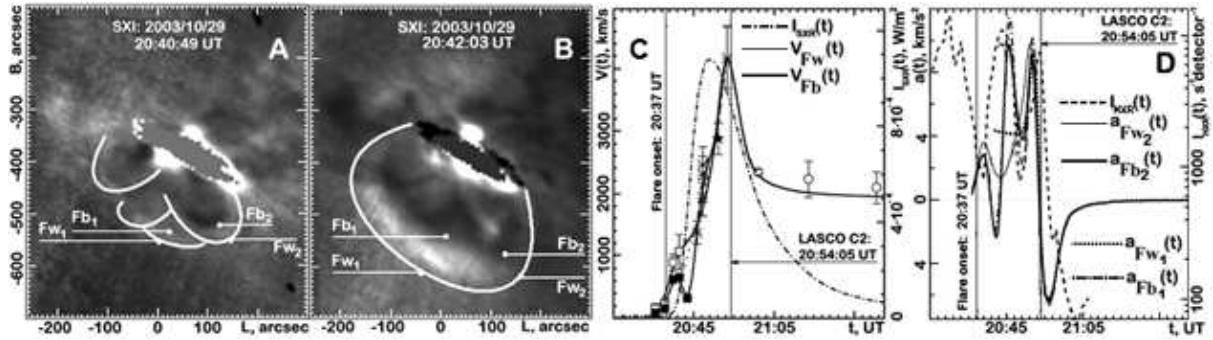


Рис. 4. То же, что на рис. 2, но для события 23.08.2005

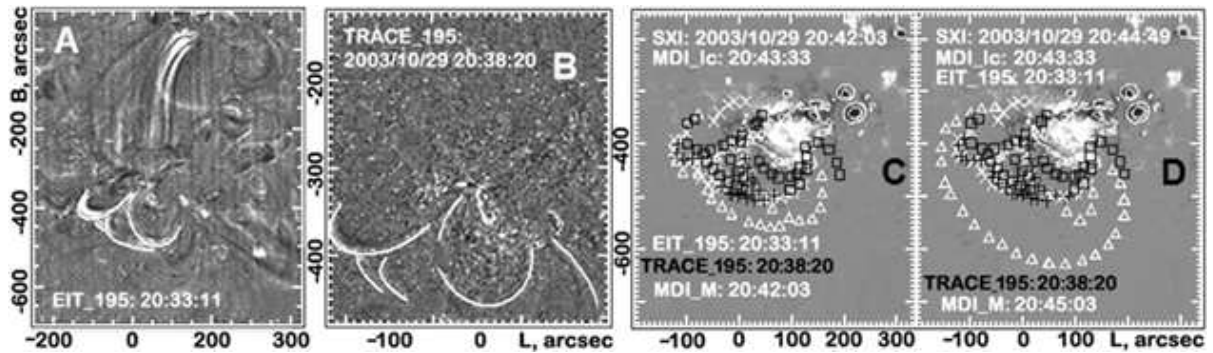
петлеобразных структур удалось выявить особенность движения ГКВМ на начальном этапе, что отражено в поведении профиля  $V(t)$ . Скорость самой быстрой “черной” петли с начала поступательного движения увеличивается, а после объединения петель в одну КВМ-структуру скорость “черной” петли резко уменьшается на  $\approx 150$  км/с, а затем снова начинает увеличиваться, рис. 5 (С). На профиле скорости “белой” петлеобразной структуры намечается такая же тенденция в поведении скорости, но четко не выражена. Профиль ускорения является сложным: с тремя пиками для “черной” и с двумя – для “белой” петлеобразной структуры, см. рис. 5 (D). Максимумы самых больших пиков “черной” петли близки по времени к максимумам двухпикового распределения  $I_{\text{HXR}}(t)$ . Близки по времени максимум самого большого пика ускорения “белой” петлеобразной структуры и максимум соответствующего пика  $I_{\text{HXR}}(t)$ . Длительность ускорения “черной” петли на полувысоте оказалась меньше длительности  $I_{\text{HXR}}(t)$ . В определенный момент времени, как и в случае для ГКВМ от 17.01.2005, движение ГКВМ от 29.10.2003 становится близким к автотомельному.

Задолго до начала поступательного движения системы петлеобразных структур, наблюдаемых по данным SXI (см. рис. 5 (A) и (B)), и сформировавшихся впоследствии ГКВМ от 29.10.2003, в линии крайнего ультрафиолета в поле зрения EIT и TRACE (рис. 6 (A) и (B)) также наблюдалось несколько примыкающих друг к другу медленно движущихся эмиссионных петлеобразных структур. На изображениях EIT и TRACE эти эмиссионные структуры удалось выделить примерно за три часа до их появления в поле зрения SXI. Кроме этого, с момента начала поступательного движения этих петлеобразных структур наблюдалось уменьшение их яркости в линиях крайнего ультрафиолета. Заметим, что формирование одной петлеобразной структуры с широким фронтом, огибающей несколько петель, рис. 5 (B), удалось зарегистрировать только по данным SXI. На рис. 5 (C, D) приводится результат сопоставления границ петлеобразных структур, видимых в различных диапазонах длин волн.

В заключение этого раздела кратко изложим некоторые обобщенные зависимости между ускорением КВМ и  $I_{\text{SXR}}(t)$ . Мы установили, что для всех рассмотренных ГКВМ-событий длительность основного ускорения  $t_{\text{ACC}}$  (время от начала движения в поле зрения SXI до выхода в поле зрения LASCO C2) близка к длительности  $t_{\text{SXR}}$  нарастания  $I_{\text{SXR}}(t)$  до максимального значения. Показано, что существует обратная корреляция между  $V_{\text{MAX}}/t_{\text{ACC}}$  и  $V_{\text{MAX}}/t_{\text{SXR}}$  с одной стороны, а также между  $t_{\text{ACC}}$  и  $t_{\text{SXR}}$  – с другой, что согласуется с результатами работы (Жанг, Дерев, 2006);  $V_{\text{MAX}}$  – максимальная скорость ГКВМ с I типом профиля скорости и скорость в момент выхода КВМ в поле зрения LASCO C2 для КВМ со II типом профиля  $V(t)$ . Отметим, что в нашей работе получены зависимости для значений  $V_{\text{MAX}}$  и  $\text{max}$ , которые существенно больше по абсолютной величине, чем в работе (Жанг, Дерев, 2006).



**Рис. 5.** (A) – изображение NOAA 10486 с несколькими петлеобразными структурами, отождествленными с ГКВМ; (B) – сформировавшийся выброс с яркой фронтальной структурой; (C), (D) – то же, что на рис. 1 (F) и (G), но для события 29.10.2003 и с добавлением дополнительного значения скорости (символ “★”), рассчитанного по данным MLSO MarkIV-coronameter; (C) – символами “□” показаны скорости фронта “белых” петлеобразных структур и участков фронтальной структуры выброса, обозначенных  $Fw_1$  и  $Fw_2$  на рисунках (A) и (B), “■” – скорости “черных” структур, обозначенных соответственно  $Fb_1$  и  $Fb_2$ , “\*” – промежуточные скорости, рассчитанные по данным SXI и MarkIV-coronameter для структур  $Fw_1$ ,  $Fw_2$ ,  $Fb_1$ ,  $Fb_2$  и промежуточное значение скорости по данным MarkIV-coronameter и LASCO C2, “o” – скорости по данным LASCO, значения скорости “черной” структуры  $Fb_1$  очень близки к значениям скорости структуры, отмеченной  $Fb_2$ , поэтому профили  $V(t)$  для двух “черных” петлеобразных структур практически неразличимы; (D) – сравнение ускорения  $a(t)$  выброса с  $I_{\text{HXR}}(t)$  в диапазоне 50–100 кэВ



**Рис. 6.** (A) – изображение NOAA 10486 в  $\lambda 195 \text{ \AA}$ , соответствующее моменту времени до появления выброса в SXI (границы петлеобразных структур обведены белыми линиями); (B) – изображение NOAA 10486 с хорошо различимыми петлеобразными структурами, полученными по данным TRACE; (C) и (D) – то же, что на рис. 2 (C), (D), но для события 29.10.2003, символами “□” черного цвета обозначена граница петлеобразных структур, наблюдаемых TRACE

### 3.2 О существовании двух типов КВМ в зависимости от профиля скорости $V(t)$ . Обобщенные зависимости между ускорением КВМ и $I_{\text{SXR}}(t)$

На рис. 7 (A) и (B) сопоставлены профили  $V(t)$  исследуемых нами ГКВМ. Скорость четырех выбросов быстро достигает максимума, а затем уменьшается, рис. 7 (A). Для двух выбросов, рис. 7 (B), скорость вначале поступательного движения быстро увеличивается и затем продолжает возрастать, но существенно медленнее, а максимум скорости ГКВМ достигается в поле зрения LASCO спустя



$\approx 2$  часа с момента начала движения. Мы предполагаем, что существует два типа КВМ, различающиеся характером изменения профиля скорости  $V(t)$ , что, с нашей точки зрения, определяется свойствами АО, в которых выбросы были сформированы. Так, АО, в которых сформировались ГКВМ с профилем скорости I-го типа, представляют собой более сложные и протяженные по площади пятенные группы и с более сложной конфигурацией фотосферного магнитного поля, чем АО, в которых сформировались ГКВМ с профилем скорости II-го типа, рис. 7 (С) и (Н). Например, магнитная конфигурация NOAA 10486 29.10.2003 определена как  $\beta\gamma\delta$ , а магнитная конфигурация NOAA 10798 23.08.2005 –  $\beta\gamma$ . Отметим еще один факт, который косвенно свидетельствует в пользу того, что именно свойства АО определяют тип кинематики будущего КВМ. Например, ГКВМ от 15.01.2005 (в этот день наблюдались два ГКВМ) и 17.01.2005 являются гомологичными ГКВМ, и все они имеют приблизительно подобный тип профиля  $V(t)$ . Соответственно, ГКВМ от 22.08.2005 и 23.08.2005 возникли в одной NOAA 10798 и имели также похожие профили  $V(t)$ , отличающиеся от профилей предыдущих четырех событий. Таким образом, мы можем сделать два вывода: i) гомологичные КВМ, сформированные в одной АО, характеризуются одним типом временного профиля скорости  $V(t)$ ; ii) тип профиля  $V(t)$  КВМ определяют свойства “родительской” АО. В дальнейшем планируем проверить эти выводы для большего количества выбросов.

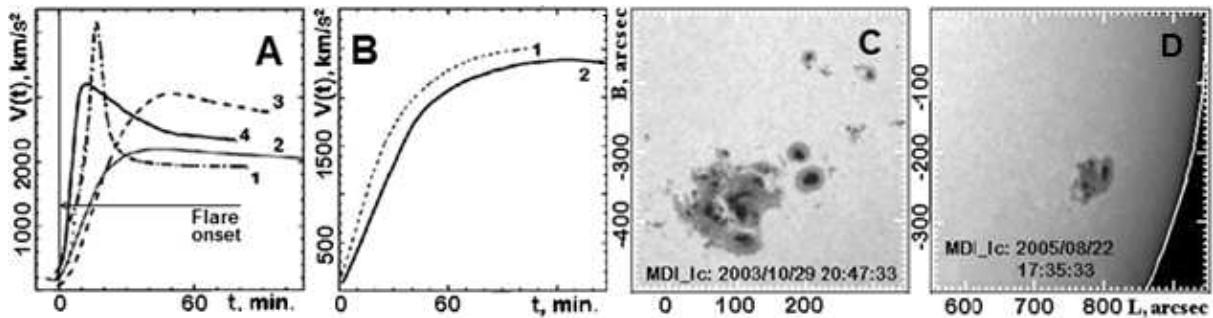


Рис. 7. (А), (В) – иллюстрация двух типов КВМ, различающихся профилем  $V(t)$ ; (А) – профили  $V(t)$  I-го типа (1 – для ГКВМ 29.10.2003, 2 – для ГКВМ 15.01.2005 (05:54UT), 3 – для КВМ 15.01.2005 (22:25UT), 4 – для КВМ 17.01.2005); (В) – профили  $V(t)$  II-го типа (1 – для КВМ 22.08.2005, 2 – для КВМ 23.08.2005); (С) и (В) – изображения групп пятен в континууме по данным MDI для двух типов ГКВМ

#### 4 Заключение

Основные результаты можно сформулировать следующим образом. i) Для быстрых КВМ, связанных с мощными вспышками, эрупция волокна не является необходимым условием для формирования выброса. ii) Наблюдаемое в ультрафиолетовом диапазоне начало движения петлеобразной структуры, отождествленной с КВМ, предшествует началу вспышки, что согласуется со “стандартной моделью КВМ/вспышка”, в соответствии с которой вспышка является следствием магнитного пересоединения в токовом слое, возникновение которого сопровождается удалением от поверхности Солнца КВМ в виде жгута. iii) Исследована кинематика фронта ГКВМ вдоль направления поступательного движения. iv) Сделан вывод о существовании двух типов КВМ, различающихся профилем скорости выброса; характер профиля зависит от свойств АО, в которой возник выброс. v) Показано, что гомологичные ГКВМ имеют один и тот же тип профиля скорости. vi) Для коронального выброса массы, наблюдавшегося 29.10.2003, нам впервые удалось зафиксировать формирование фронтальной структуры выброса в процессе одновременного движения нескольких петлеобразных

структур. vii) Все исследованные выбросы наблюдаются в поле зрения EIT в  $\lambda 195 \text{ \AA}$  как эмиссионные петли (или, в случае для события от 29.10.2003, как совокупность петель) за несколько часов до их регистрации в рентгеновском диапазоне; мы предполагаем, что КВМ формируются вследствие нарушения равновесия этих эмиссионных петель. viii) Установлены зависимости между ускорением и длительностью ускорения ГКВМ, а также связь этих параметров с длительностью нарастания  $I_{\text{SXR}}(t)$ .

Мы считаем, что полученные результаты создают основу для разработки новых моделей формирования и начальной стадии движения КВМ, более соответствующих наблюдениям, чем ранние модели (Форбс и др., 2006).

Работа выполнена при поддержке ГК №02.740.11.0576 Федеральной Программы “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России”. Авторы благодарны командам GOES и GOES-12/SXI, RHESSI, TRACE, SOHO/EIT, SOHO/LASCO и MLSO MarkIV-coronameter за возможность свободно использовать данные этих инструментов. Авторы благодарны В.В. Гречневу за полезные обсуждения результатов работы.

## Литература

- Бак-Слесличка и др. (Bak-Steslicka U., Kolomanski S., Mrozek T.) // *Solar Phys.* 2013. V. 283. P. 505.
- Бейн и др. (Bein B.M., Berkebile-Stoiser S., Veronig A.M., Temmer M., Vršnak B.) // *Astrophys. J.* 2012. V. 755. P. 44.
- Галлахер и др. (Gallagher P.T., Lawrence G.R., Dennis B.R.) // *Solar Phys.* 2003. V. 588. P. 53.
- Говард и др. (Howard R.A., Michels D.J., Sheeley N.R.Jr., Koomen M.J.) // *Astrophys. J.* 1982. Part 2. V. 263. P. L101.
- Гопалсвами и др. (Gopalswamy N., Yashiro S., Akiyama S.) // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 112. A06112.
- Гопалсвами и др. (Gopalswamy N., Yashiro S., Michalek G., Xie H., Mäkelä P., Vourlidas A., Howard R.A.) // *Sun and Geosphere.* 2010. V. 5. P. 7.
- Гречнев и др. (Grechnev V.V., Uralov A.M., Slemsin V.A., Chertok I.M., Filippov B.P., Rudenko G.V., Temmer M.) // *Solar Phys.* 2013. doi: 10.1007/s11207-013-01316-6.
- Жанг, Дере (Zhang J., Dere K.P.) // *Astrophys. J.* 2006. V. 649. P. 1100.
- Мунро и др. (Munro R.H., Gosling J.T., Hildner E., MacQueen R.M., Poland A.I., Ross C.L.) // *Solar Phys.* 1979. V. 61. P. 201.
- Патсоуракос и др. (Patsourakos S., Vourlidas A., Stenborg G.) // *Astrophys. J. Let.* 2010. V. 724. P. L188.
- Патсоуракос и др. (Patsourakos S., Vourlidas A., Stenborg G.) // *Astrophys. J.* 2013. V. 764. P. 125.
- Санмугараджу и др. (Shanmugaraju A., Moon Y.-J., Cho K.-S., Bong S. C., Gopalswamy N., Akiyama S., Yashiro S., Umopathy S., Vršnak B.) // *Astrophys. J.* 2010. V. 708. P. 450.
- 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.
- Теммер и др. (Temmer M., Veronig A.M., Kontar E.P., Krucker S., Vršnak B.) // *Astrophys. J.* 2010. V. 712. P. 1410.
- Уралов и др. (Uralov A.M., Grechnev V.V., Hudson H.S.) // *Geophys. Res.* 2005. V. 110. A05104.
- Файнштейн В.Г., Егоров Я.И. // *Космич. исслед.* 2013. Т. 51. С. 4.
- Форбс и др. (Forbes T.G., Linker J.A., Chen J., Cid C., K'ota J., Lee M.A, Mann G. and 7 coauthors) // *Space Sci. Rev.* 2006. V. 123. P. 251.
- Хилл и др. (Hill S.M., Pizzo V.J., Balch C.C. and 33 coauthors) // *Solar Phys.* 2005. V. 226. P. 255.