

УДК 523.98

## СРАВНЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ГЕНЕРАЦИИ КВМ, ДВИЖУЩИХСЯ В ПОЛЕ ЗРЕНИЯ КОРОНОГРАФОВ LASCO С РАЗЛИЧНОЙ СКОРОСТЬЮ

© 2019 г. Ю. С. Загайнова<sup>1</sup> \*, В. Г. Файнштейн<sup>2</sup><sup>1</sup>Институт земного магнетизма и распространения радиоволн РАН, Москва, Троицк, Россия<sup>2</sup>Институт солнечно-земной физики РАН, Иркутск, Россия

\*yuliazagaynova@mail.ru

Поступила в редакцию 28.03.2019 г.

После доработки 26.06.2019 г.

Принята к публикации 04.07.2019 г.

Настоящая работа направлена на получение ответа на следующий вопрос: существуют ли принципиальные различия в генерации регистрируемых в поле зрения коронографов LASCO корональных выбросов массы (КВМ) с различными скоростями, прежде всего с маленькими и большими? К быстрым КВМ условно были отнесены выбросы массы, линейная проекционная скорость которых в поле зрения LASCO составляет  $V_{LIN} > 1500$  км/с, к медленным –  $V_{LIN} \leq 600$  км/с. КВМ с  $V_{LIN}$  от 600 до 1500 км/с мы отнесли к выбросам массы с промежуточными скоростями. Результаты анализа приводим на примере трех событий КВМ типа гало (быстрого, медленного и движущегося с промежуточной скоростью) с источниками в пятенных группах, удаленных от центра солнечного диска не более чем на  $45^\circ$ . Для анализа использовали данные телескопов SDO/AIA и инструмента SDO/HMI, а также коронографов LASCO C2 и C3. Сопоставлены свойства активных областей, в которых возникли КВМ с разными скоростями. Сопоставлены морфологические особенности формирования отобранных выбросов массы по наблюдениям в линиях крайнего ультрафиолета и особенности их кинематики. С использованием данных векторных измерений фотосферного магнитного поля инструментом SDO/HMI над областями формирования КВМ в нелинейном бессиловом приближении рассчитаны распределения магнитного поля с высотой. Анализ этих распределений показал, что до начала связанной с КВМ вспышки быстрота изменения поля с высотой над местом генерации КВМ заметно отличается для всех отобранных событий.

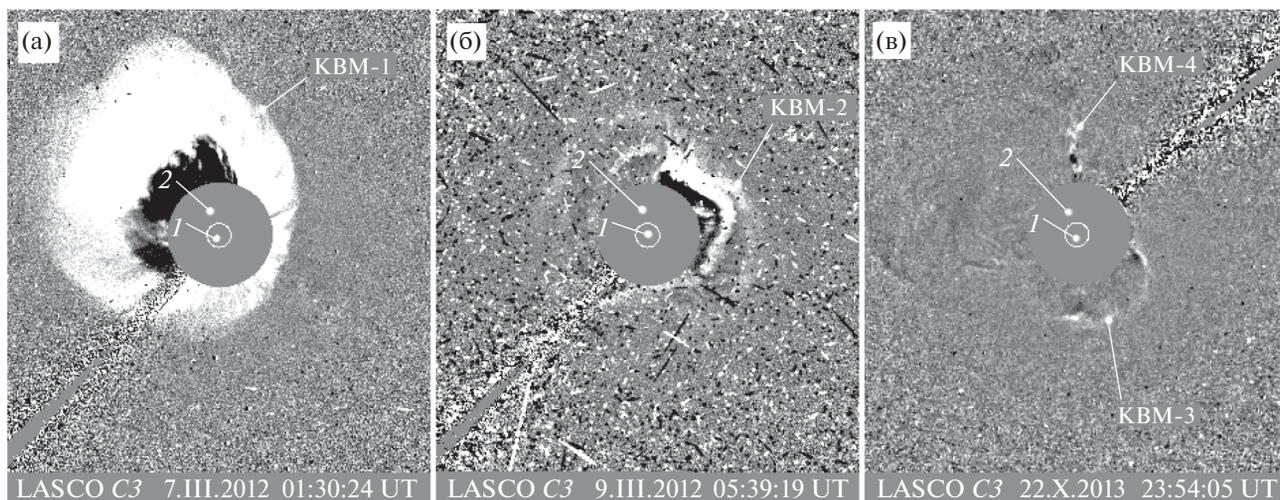
DOI: 10.1134/S0023420619060104

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Корональные выбросы массы (КВМ) характеризуются широким спектром максимальных скоростей  $V_{max}$  по наблюдениям в поле зрения коронографов LASCO [1]. Их скорость варьируется от нескольких десятков км/с до более 3000 км/с. В то же время, несмотря на множество предложенных механизмов генерации КВМ [2] и многолетние исследования корональных выбросов массы (см. обзор [3]), до сих пор не получен ответ на вопрос: что определяет скорость каждого КВМ? В работе [4] высказано предположение, что существует два типа КВМ: связанные со вспышками и связанные с эрупцией волокон. Причем КВМ из первой группы в среднем наиболее быстрые и имеющие меньшие ускорения, чем КВМ из 2-й группы, имеющие большие ускорения. Авторы в работе [5] пришли к выводу, что КВМ в зависимости от их максимальной скорости  $V_{max}$  можно разделить на два класса: (1) “постепенные” КВМ с  $V_{max} = 400–600$  км/с, связанные с эрупцией протубе-

ранцев, скорость которых увеличивается до максимального значения постепенно в поле зрения коронографа; (2) “импульсные” КВМ, связанные с солнечными вспышками, для которых  $V_{max}$  составляет более 750 км/с и может достигаться еще до выхода КВМ в поле зрения LASCO. Позже стало очевидно, что такое разделение на классы не является “абсолютным” (см. [6] и цитируемую там литературу): медленные КВМ могут оказаться импульсными и связанными со вспышками, быстрые могут оказаться постепенными и связанными с эрупцией волокна. Также, и быстрые, и медленные КВМ могут сопровождаться, как слабыми, так и сильными вспышками. Можно было бы ожидать, что если быстрые и медленные КВМ формируют две отдельные группы, то распределение КВМ по скоростям должно быть, как минимум, двухпиковым. Но неоднократно было показано, что распределение КВМ по скоростям имеет один пик (см. [7] и цитируемую там литературу).

Позже авторы в работе [8] построили модель движения бессилового жгута во внешнем магнит-



**Рис. 1.** Разностные изображения исследуемых выбросов массы, движущихся с различной линейной скоростью в поле зрения коронографов LASCO, где (а) – быстрый КВМ (КВМ-1), (б) – КВМ с промежуточной скоростью (КВМ-2). Низкое качество изображения связано с воздействием на регистратор коронографа высокоэнергичных заряженных частиц из области события), (в) – медленный КВМ (КВМ-3). Обозначения: 1 – схематическое изображение диска Солнца, 2 – затмевающего диска коронографа LASCO C3, KBM-4 – выброса массы с малым угловым размером  $\Delta W \sim 20^\circ$  с позиционным углом  $PA \sim 4^\circ$ , зарегистрированный LASCO C2 22.X.2012 в более ранний момент времени 20:00:06 UT (в данной работе не исследовался).

ном поле различной конфигурации (дипольная или квадрупольная) и пришли к выводу, что если поле быстро уменьшается с высотой (квадрупольная конфигурация), то формируется быстрый КВМ, если медленно (дипольная конфигурация), то возникает медленный КВМ.

В настоящей работе исследованы особенности формирования трех КВМ: быстрого, медленного и с промежуточной скоростью. Сделан вывод, что основные детали формирования трех КВМ по наблюдениям Солнца в крайнем ультрафиолете близки. КВМ начинает формироваться с эрупции волокна, воздействие которого на окружающую корону приводит к возникновению фронтальной структуры (ФС) КВМ. Получены временные профили скорости ФС КВМ. Сопоставлены скорости  $V_{LIN}$  с быстротой спада поперечной компоненты магнитного поля  $B_t$  над линией раздела полярности (ЛРП) фотосферного поля. Показано, что чем больше перед началом связанной с КВМ вспышки усредненная по высоте в пределах 100 Мм и вдоль ЛРП в пределах области формирования КВМ быстрота спада  $B_t$ , выраженная через “decay-index” [9]  $n(h) = -\frac{h}{B_t} \cdot \frac{dB_t}{dh}$ , тем больше скорость КВМ в поле зрения LASCO. Аналогичная связь между  $V_{LIN}$  и  $n$  (чем больше  $n$  на одинаковых высотах для каждого КВМ, тем больше  $V_{LIN}$ ) для рассмотренных КВМ обнаружена на нескольких высотах, на которых проводился расчет  $n(h)$ .

## 2. ДАННЫЕ И МЕТОДЫ ИХ АНАЛИЗА

Для исследования отобраны три выброса массы с разной линейной скоростью в поле зрения коронографов LASCO (рис. 1): (1) быстрый КВМ, зарегистрированный LASCO C2 7.III.2012 (00:24:06 UT), возникший в активной области (АО) NOAA 11429 (Хэйловский класс пятенной структуры  $\beta\gamma\delta$ ) и имеющий в поле зрения LASCO скорость  $V_{LIN} = 2684$  км/с; (2) КВМ с промежуточной скоростью  $V_{LIN} = 950$  км/с, зарегистрированный LASCO C2 9.III.2019 (04:26:09 UT) и сформировавшийся в АО NOAA 11429 (Хэйловский класс пятенной структуры  $\beta\gamma\delta$ ); (3) медленный КВМ со скоростью  $V_{LIN} = 459$  км/с, зарегистрированный LASCO C2 22.X.2013 (21:48:06 UT) в АО NOAA 11875 (Хэйловский класс пятенной структуры  $\beta\gamma\delta$ ). Информация о свойствах КВМ взята из каталога [https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\\_list/HALO/index.html](https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/HALO/index.html).

Условно к медленным КВМ отнесли выбросы массы с линейной проекционной скоростью  $V_{LIN} \leq 600$  км/с, к быстрым КВМ –  $V_{LIN} \geq 1500$  км/с, к промежуточным – выбросы массы со скоростями в диапазоне между 600 и 1500 км/с. Для обеспечения большей точности обработки изображений Солнца в каналах крайнего ультрафиолетового излучения и измерений магнитного поля мы отобрали для исследования КВМ типа “гало” с источниками в пределах  $45^\circ$  относительно центра солнечного диска. В этом случае измеряемая проекционная скорость КВМ представляет собой в основном скорость расширения КВМ в

поперечном направлении  $V_e$ . В тоже время, наибольший интерес представляет ответ на вопрос: существует ли связь между скоростью КВМ вдоль направления его движения  $V_r$  и индексом спада  $n$  поперечной компоненты магнитного поля? Наличие связи между  $V_r$  и  $n$  косвенно следует из результатов работы [10], в которой показано, что между  $V_e$  и  $V_r$  существует зависимость, согласно которой с ростом  $V_e$  в среднем  $V_r$  также увеличивается.

Формирование КВМ изучалось с использованием многоволновых данных инструментов с высоким временным и пространственным разрешением Atmospheric Imaging Assembly (AIA) [11] на борту *Solar Dynamics Observatory (SDO)* [12], находящихся в свободном доступе на сайте <http://jsoc.stanford.edu/ajax/exportdata.html>. Инструмент AIA обеспечивает множественные одновременные полно-дисковые изображения короны и переходной зоны до  $0.5R_s$  над солнечным лимбом с пространственным разрешением 1.5 угл. с и временным разрешением 12 с. Для детектирования различных проявлений солнечной активности (СА), мы использовали наблюдения в нескольких спектральных каналах AIA 94 Å (температура, соответствует пику эмиссии  $T_M = 6.5 \cdot 10^6$  K), AIA 304 Å ( $T_M \approx 0.05 \cdot 10^6$  K), AIA 171 Å ( $T_M = 0.6 \cdot 10^6$  K), AIA 193 Å ( $T_M = 1.6 \cdot 10^6$  K), AIA 211 Å ( $T_M = 2 \cdot 10^6$  K) и AIA 131 Å ( $T_M = 10.1 \cdot 10^6$  K) [11]. Для поиска ФС для каждого исследуемого выброса массы мы использовали разностные изображения Солнца в различных каналах инструмента AIA.

Для последующих расчетов магнитного поля в пространстве в АО использовались векторные измерения фотосферного поля инструментом Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) [13] на борту *SDO*. Размер пикселя регистрирующей матрицы инструмента  $\approx 0.5$  угл. с, временное разрешение инструмента  $\approx 12'$ . При этом использовались данные HMI, в которых измерения магнитного поля были скорректированы с учетом  $\pi$ -неопределенности нахождения поперечной компоненты поля. Векторные измерения магнитного поля позволяли определить три компоненты фотосферного магнитного поля:  $B_x$ ,  $B_y$  (горизонтальные компоненты поля) и  $B_z$  (вертикальная компонента поля). Трехмерные расчеты поля проводились с использованием нелинейного бессилового приближения (при ссылках на это приближение далее будем использовать аббревиатуру “NLFFF”, принятую в англоязычной научной литературе). В данном исследовании для восстановления магнитного поля в NLFFF приближении применялась эффективная реализация оптимизационного метода, предложенного в работе [14]. Описание этой реализации приведено в работе [15]. Из

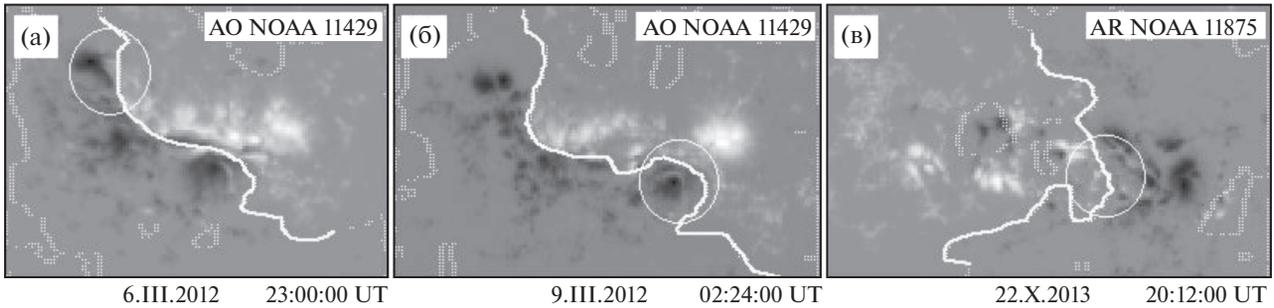
NLFFF расчетов поля для всех изученных событий были построены изменения с высотой поперечной компоненты магнитной индукции  $B_i(t) = \sqrt{B_x^2 + B_y^2}$  над главной линией раздела полярности (ЛРП) поля АО до высоты  $\sim 100$  Мм. Также над ЛРП были построены распределения по высоте индекса спада магнитного поля  $n(h) = -\frac{h}{B_i} \cdot \frac{dB_i}{dh}$ , где  $h$  отсчитывается от уровня фотосферы.

Дополнительная информация о свойствах АО, в которых наблюдали формирование исследуемых КВМ и связанных с ними вспышек, была взята с сайта <https://solarmonitor.org/> и из таблицы в колонке (Movies, plots, & links/PHTX) для каждого события на сайте [https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\\_list/index.html](https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/index.html).

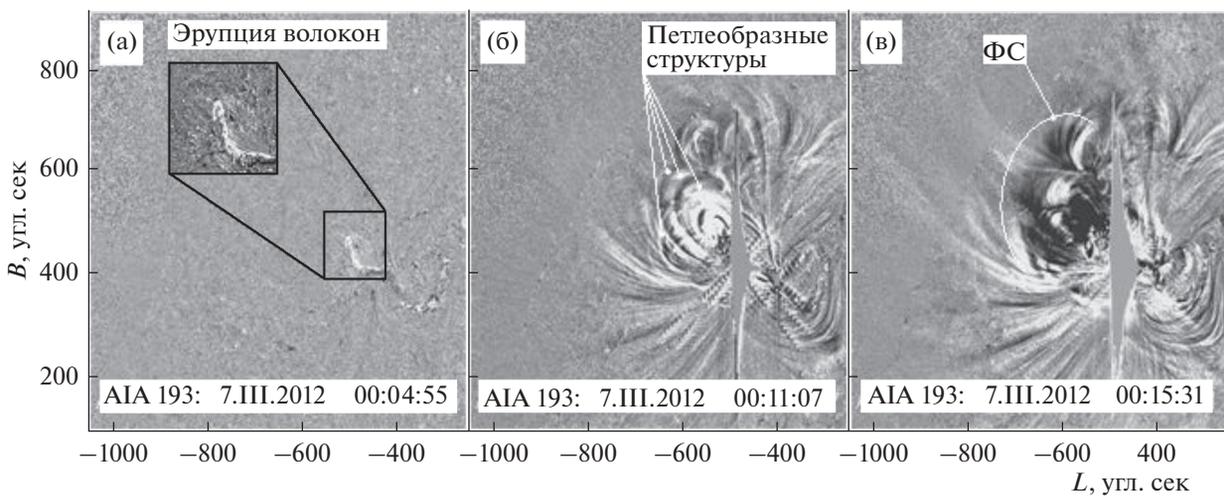
### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ

**3.1. Морфология формирования быстро выброса массы.** На рис. 2а показано распределение радиальной компоненты фотосферного магнитного поля  $B_r$  в АО, в которой возник быстрый КВМ. На этом распределении жирной линией белого цвета показана ЛРП поля (линия  $B_r = 0$ ), место генерации КВМ отмечено окружностью. В 00:02 UT по данным *GOES* началась рентгеновская вспышка и, приблизительно в это же время наблюдалось начало эрупции магнитно-плазменного жгута, наблюдаемого на разностных изображениях Солнца в канале 193 Å (рис. 3а). Из-за сильной засветки в области канала волокна вдоль ЛРП не позволило точно сказать, какова природа обсуждаемой эруптивной структуры. На изображениях в канале 304 Å и в линии *H $\alpha$*  выделить волокно оказалось невозможно. Далее по тексту условно будем говорить об эрупции волокна.

Спустя некоторое время рядом с местом эрупции волокна наблюдалось множество эмиссионных петлеобразных структур, движущихся с разными скоростями, как мы предполагаем, вверх (рис. 3б). Спустя не менее четырех минут ( $\sim 00:15:31$  UT) за пределами места эрупции волокна начинает формироваться фронтальная структура (ФС) КВМ (рис. 3в). Эта последовательность событий подобна обнаруженным ранее, сопровождающих генерацию КВМ с разными скоростями, полученных разными авторами КВМ [16, 17]: эрупция волокна приводит к возмущению вышележащих слоев эмиссионной короны, в результате чего возникает последовательность движущихся друг за другом с разной скоростью петлеобразных структур (при этом максимальная скорость структур, зарегистрированных позже, превышает скорость структур, возникших раньше), которые позже собираются в



**Рис. 2.** Изображения распределения радиальной компоненты фотосферного магнитного поля  $B_r$  в АО, в которой возник быстрый КВМ (а), КВМ с промежуточной скоростью (б) и медленный КВМ (в); на распределениях  $B_r$  полужирной линией белого цвета выделена ЛРП магнитного поля в АО ( $B_r = 0$ ), окружностями на изображениях отмечены участки АО, где наблюдалось формирование каждого исследуемого выброса массы.



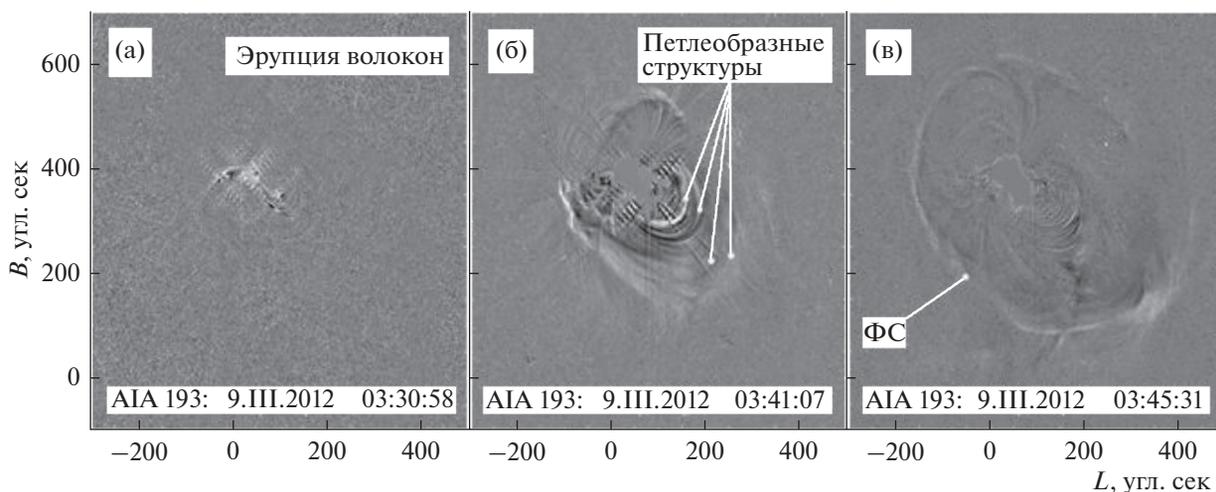
**Рис. 3.** Последовательность событий, сопровождавших формирование быстрого КВМ, (а) эрупция волокна, которая приводит к возмущению вышележащих слоев короны, (б) последовательность движущихся друг за другом с разной скоростью петлеобразных структур, (в) сформировавшаяся фронтальная структура (ФС) выброса массы.

одном месте (продолжая поступательное движение), где формируют ФС.

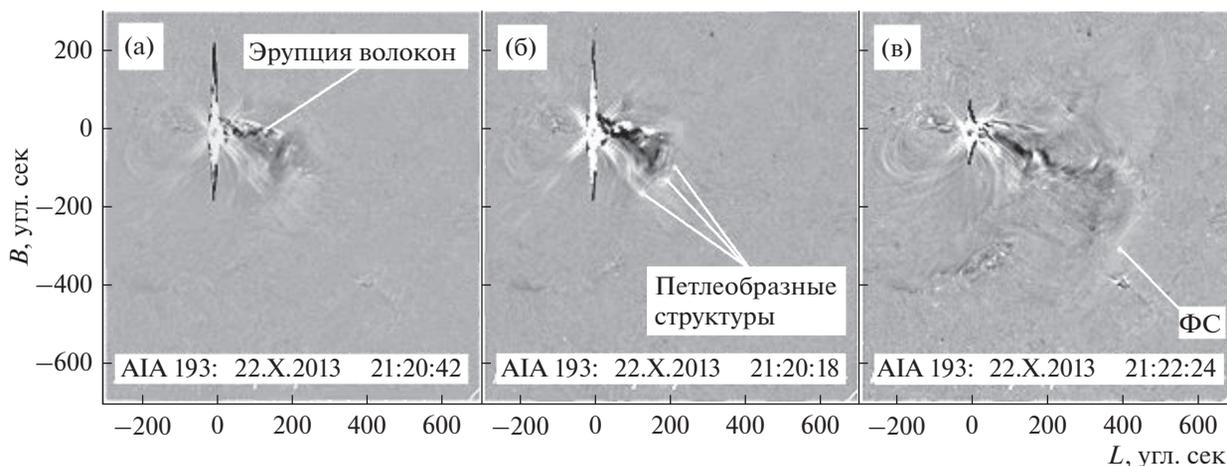
**3.2. Морфология формирования выброса массы с промежуточной скоростью.** Рис. 2б и 4, на котором показано формирование КВМ с промежуточной скоростью, зарегистрированного LASCO C2 от 9. III. 2012 в 04:26:09 UT, аналогичны рис. 2а, 3. Отметим важную особенность: быстрый выброс массы и с промежуточной скоростью наблюдались в одной АО NOAA 11429 с разницей в двое суток. В этой АО между моментами возникновения двух исследуемых КВМ наблюдалось множество солнечных вспышек, в том числе вспышек GOES классов M и X, а также формирование ряда КВМ. Это может свидетельствовать о постоянной перестройке магнитной конфигурации указанной АО перед началом генерации КВМ с промежуточной скоростью. Однако детали формирования выброса массы с промежуточной скоростью аналогичны деталям формирования быстрого КВМ:

эрупция волокна, движение множества петлеобразных структур с последующим формированием ФС КВМ. Возможно, следует говорить об одном механизме формирования быстрого КВМ и КВМ с промежуточной скоростью.

**3.3. Морфология формирования медленного выброса массы.** Рис. 2в, 5 иллюстрирует отдельные этапы формирования медленного КВМ, которое начинается с эрупции магнитоплазменного жгута (или волокна). Эрупция волокна приводит к появлению движущихся петлеобразных структур, максимальная скорость которых превышает скорость волокна. На последнем этапе, как видно на рис. 5в возникшее возмущение солнечной короны (эрупция волокна и возникновение движущихся петлеобразных структур) приводит к формированию ФС. Отметим, что качество изображений для этого события существенно хуже в сравнении с качеством изображений для двух рассмотренных выше КВМ. Достоверно можно



**Рис. 4.** Последовательность событий, сопровождавших формирование промежуточного КВМ, (а) эрупция волокна, которая приводит к возмущению вышележащих слоев короны, (б) последовательность движущихся друг за другом с разной скоростью петлеобразных структур, (в) сформировавшаяся фронтальная структура выброса массы.

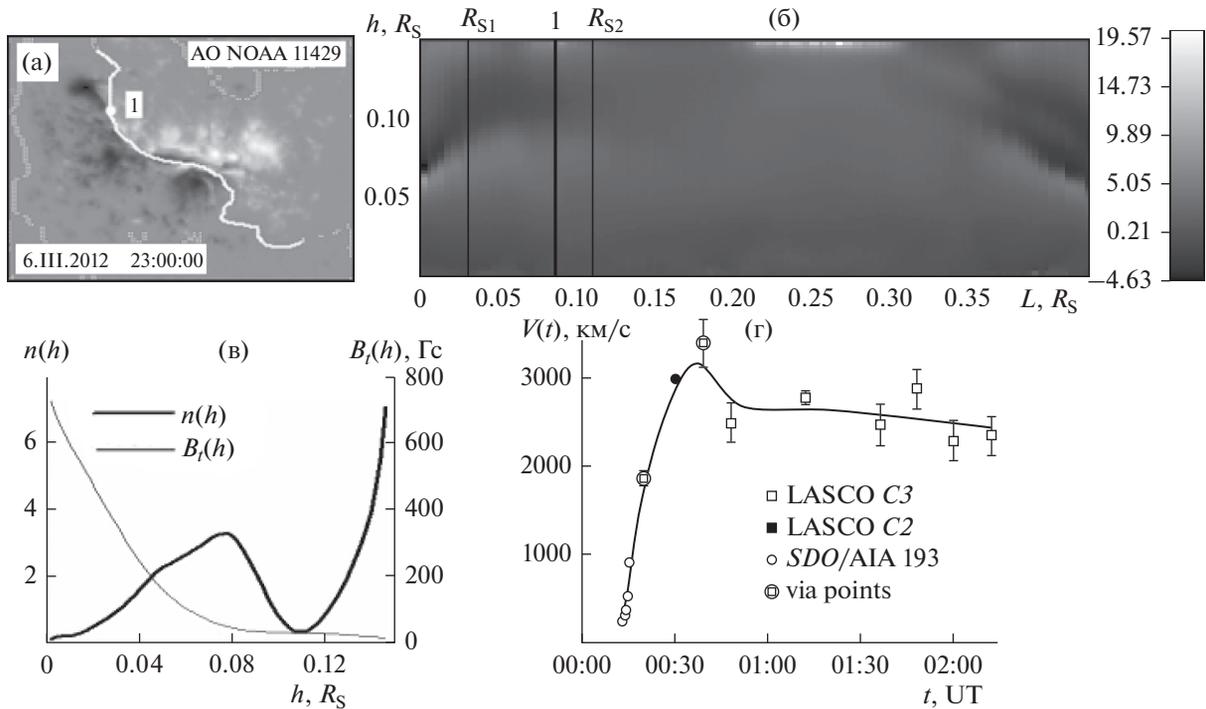


**Рис. 5.** Последовательность событий, сопровождавших формирование медленного КВМ, (а) эрупция волокна, которая приводит к возмущению вышележащих слоев короны, (б) последовательность движущихся друг за другом с разной скоростью петлеобразных структур, (в) сформировавшаяся фронтальная структура (ФС) выброса массы (отчетливо выделяется лишь фрагмент ФС).

говорить о движении жгута после начала связанной с КВМ вспышки  $T_F = 21:15$  UT. Вопрос о механизме генерации медленного выброса массы, т.е. не возникает ли данная вспышка в рамках стандартной модели вспышки вследствие эрупции волокна, остается открытым.

**3.4. Сравнение кинематики выбросов массы с разными скоростями с особенностями пространственных вариаций магнитного поля в области их формирования.** На рис. 6а, 7а и 8а показаны распределения радиальной компоненты магнитного поля  $B_r$  до начала солнечной вспышки в АО, где возникает каждый из исследуемых выбросов массы. На этих распределениях показана ЛРП маг-

нитного поля (где  $B_r = 0$ ). В одной из точек на ЛРП (обозначена цифрой “1”) в области формирования выброса массы построены распределения  $B_r(h)$  и  $n(h)$  (см. соответственно графики на рис. 6в, 7в и 8в). На рис. 6б, 7б и 8б для каждого из трех КВМ показано распределение в зависимости от высоты “decay-index”  $n(h)$  над каждой точкой по всей длине ЛРП магнитного поля (высота и расстояние вдоль ЛРП выражены в солнечных радиусах  $R_S$ ). Для быстрого КВМ расчеты  $n(h)$  проводились в момент времени 6.III.2012 (23:00 UT), для КВМ с промежуточной скоростью – 9.III.2012 (02:24 UT), для медленных КВМ – 22.X.2013 (20:12 UT), т.е. за  $\sim 1$  ч до начала связанных с вы-



**Рис. 6.** (а) распределение радиальной компоненты магнитного поля  $B_r$  за час до начала связанной с КВМ вспышки в пределах АО NOAA 11429 с нанесенной ЛРП (жирная белая линия), (б) распределение значений “decay-index” с высотой  $n(h)$  вдоль ЛРП за час до начала формирования выброса массы, (в) график распределения значений  $B_r$  и “decay-index”  $n$  с высотой в точке 1 (см. (а) и (б)) в области формирования быстрого выброса массы, (г) кинематика быстрого выброса массы. Цифрой 1 на рисунках (а) и (б) отмечена точка на ЛРП в области формирования выброса массы, для которой построены распределения значений “decay-index” с высотой  $n(h)$ , *via point* на рисунке (г) значение скорости выброса массы, полученное усреднением значения скорости в предыдущий и последующий моменты времени по данным с разных инструментов (AIA и LASCO C2).

бросами массы вспышек. На рис. 6в, 7в и 8в показаны примеры поведения с высотой  $B_r(h)$  и  $n(h)$  над выделенными точками на ЛРП в пределах области формирования КВМ. Видно, что во всех случаях  $B_r(h)$  уменьшается с высотой практически монотонно, но при этом быстрота спада поперечной компоненты поля, характеризуемая “decay-index”, существенно меняется в зависимости от высоты. Тем не менее, на больших измеренных высотах отчетливо наблюдается связь  $n(h)$  со скоростью скорости КВМ  $V_{LIN}$  (см. рис. 6г, 7г и 8г): чем больше “decay-index” на высоте  $h > 0.13R_S$ , тем больше скорость КВМ. Аналогичная связь между  $V_{LIN}$  и  $n$  наблюдается также на малых высотах от  $h = 0.03R_S$  до  $h = 0.04R_S$  и на высоте, где выявлен локальный максимум на распределении  $n(h)$ :  $h = 0.08R_S$  (быстрый КВМ),  $0.06R_S$  (КВМ с промежуточной скоростью) и  $0.04R_S$  (КВМ с наименьшей скоростью) (рис. 6в–8в). Заметим, что высота, на которой наблюдался локальный максимум, зависит от максимальной скорости выброса массы: чем больше скорость  $V_{LIN}$ , тем выше

на  $n(h)$  можно различить локальный экстремум. Условно, “малыми высотами” далее будем называть высоты от уровня фотосферы до локального максимума на зависимости  $n(h)$ , т.е. интервал высот, на которых возможно беспрепятственное ускорение формирующихся выбросов массы. К “большим высотам” отнесли  $h > 0.13R_S$ . А интервал высот, на котором наблюдаются локальные экстремумы и до  $h < 0.13R_S$ , для краткости изложения результатов исследования отнесли к “промежуточным высотам”.

На рис. 6г, 7г и 8г показан временной профиль скорости КВМ, объединяющий движение ФС КВМ в поле зрения телескопа AIA, наблюдающего Солнце в канале 193 Å, и в поле зрения коронографов LASCO. Максимум скорости наблюдался в поле зрения коронографов LASCO через ~15 мин после формирования ФС КВМ по данным SDO/AIA 193 Å. Видно, что профиль скорости характерен для, так называемых импульсных КВМ, для которых скорость выброса массы быстро достигает максимального значения, а затем начинает уменьшаться [5]. КВМ с промежуточной ско-

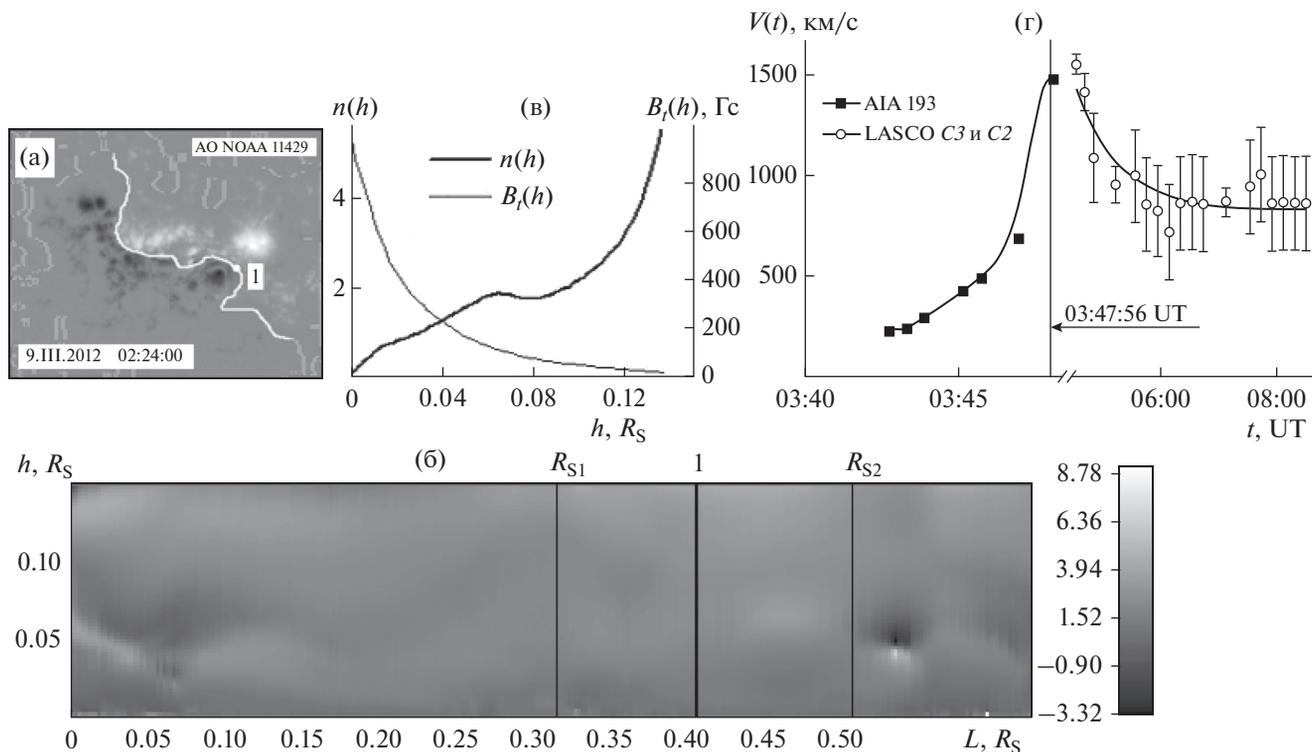


Рис. 7. То же, что на рис. 6, но для КВМ с промежуточной скоростью (без точки *via point* на графике  $V(t)$ ).

ростью также можно отнести к импульсным. При этом максимальная скорость наблюдалась через  $\sim 5$  мин после формирования ФС КВМ и превысила 1500 км/с еще до выхода выброса в поле зрения коронографа LASCO C2, точнее максимум скорости приходится на границу поля зрения инструментов SDO/AIA 193 Å и LASCO C2. Профиль скорости медленного КВМ также напоминает профиль импульсного КВМ на фоне большого разброса скоростей в поле зрения LASCO. Максимум скорости медленного КВМ наблюдался в поле зрения инструмента SDO/AIA 193 Å спустя  $\sim 1.5$  мин с момента формирования ФС. Здесь следует отметить еще одно характерное отличие поведения кинематики всех трех исследуемых КВМ: чем меньше максимальная скорость выброса массы, тем быстрее и на меньших высотах выброс массы ее достигает. Возможно, это также связано с обнаруженными нами особенностями пространственных вариаций магнитного поля над областью формирования каждого рассмотренного нами КВМ.

Можем ли мы на основании полученных результатов сделать вывод, что чем больше скорость спада поперечной компоненты магнитного поля над ЛРП магнитного поля, тем больше линейная проекционная скорость КВМ  $V_{LIN}$  в поле зрения коронографов LASCO? Используя значения  $n(h)$  на больших высотах  $N > 0.013R_S$  для сравнения с

$V_{LIN}$ , по-видимому, можем сделать такой вывод. Согласно графикам (в) и (г) на рис. 6, 7 и 8: для быстрого КВМ  $n_{max} \sim 7$ , а максимум скорости составил  $V_{max} \sim 3000$  км/с (линейная проекционная скорость выброса массы  $V_{LIN} = 2684$  км/с); для КВМ с промежуточной скоростью  $V_{max} \sim 1500$  км/с ( $V_{LIN} = 950$  км/с) и  $n_{max} \sim 5$ , для медленного КВМ  $V_{max} \sim 550$  км/с ( $V_{LIN} = 459$  км/с) и  $n_{max} \sim 3$  (где  $n_{max}$  – значение “decay-index” на больших высотах  $h > 0.13R_S$  до начала связанной с КВМ вспышки,  $V_{max}$  – максимальное значение скорости выброса массы в проекции на плоскость неба из восстановленного пространственного профиля скорости по данным различных инструментов на рис. 6г, 7г, 8г).

Сравнение  $n(h)$  и  $V_{LIN}$  на малых и средних высотах ( $h < 0.08R_S$ ), скорее всего, может привести к не совсем корректным выводам. Причина этого заключается в том, что на малых высотах на распределение  $B_i(h)$  и  $n(h)$  над ЛРП магнитного поля оказывает влияние магнитное поле волокна (или, в общем случае магнитного жгута), играющих большую роль в формировании выбросов массы [18]. Использование данных векторных наблюдений для наших расчетов магнитных полей в нижней эмиссионной короне позволяет говорить о том, что мы работаем не с внешним магнитным

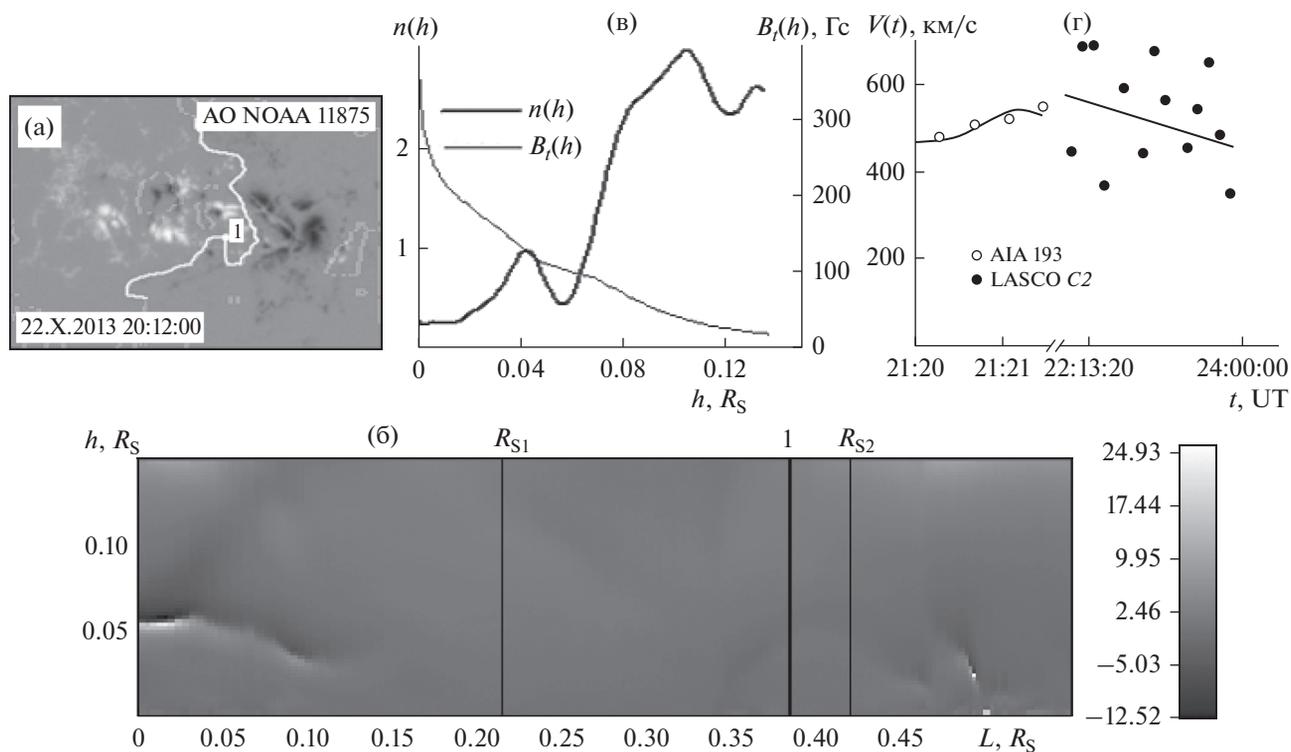


Рис. 8. То же, что на рис. 6, но для медленного КВМ (без точки *via point* на графике  $V(t)$ ).

полем в короне, как, например, в расчетах, выполненных в работе [8], а с суммарным распределением магнитного поля в короне, в том числе с магнитным полем волокон. Так, характерная высота волокон в активных областях варьируется в широком диапазоне от 7 до 10–20 Мм [19] ( $10 \text{ Мм} = 0.01437 R_S$ ). При этом волокна АО могут иметь разные высоты, длину и величину поля в конкретных событиях. По этой причине корректным может считаться сравнение  $n(h)$  и  $V_{LIN}$  для распределений магнитного поля, внешнего по отношению к волокнам (которые в дальнейшем могут эруптировать и участвовать в формировании КВМ), из которого исключен вклад магнитного поля волокна. Практически сделать это довольно сложно, т.к. измерить магнитное поле в произвольном волокне не представляется возможным. По этой причине целесообразнее работать с распределениями  $n(h)$  на высотах  $0.144 R_S > h > 0.13 R_S$ . Кроме этого, обратим внимание на наличие локального максимума на распределении  $n(h)$  в области формирования каждого КВМ на определенных высотах  $h$ . Для быстрого КВМ значение “decay-index” в локальном максимуме составило  $n(h \sim 0.08 R_S) \approx 3$ , для КВМ с промежуточной скоростью  $n(h \sim 0.06 R_S) \approx 2$ , для медленного –  $n(h \sim 0.04 R_S) \approx 1$ . Сравнивая  $n$  в локальном максимуме для каждого рассмотренного КВМ  $V_{LIN}$  и максимальную скорость  $V_{max}$  на распределениях  $V(h)$

(рис. 6г, 7г, 8г), можно сделать вывод, что чем больше  $n$  в этом локальном максимуме перед вспышкой, тем больше  $V_{LIN}$  и  $V_{max}$ .

Выявленные особенности в поведении распределений “decay-index” с высотой на различных высотах требуют отдельного исследования, и, возможно, связаны со сложной топологией магнитного поля над АО. Наличие локальных экстремумов на распределении на высотах  $h > 0.04 R_S$  в период времени вне эруптивных процессов в исследуемых АО (за 1 ч до начала вспышки) можно объяснить присутствием арочных структур разного масштаба, имеющих разную высоту, а также отличающихся углом наклона к поверхности фотосферы.

Для того чтобы минимизировать влияние магнитного поля волокон на распределения  $B_t$  и  $n(h)$ , т.е. более корректно выявить существование корреляции между  $n(h)$  и  $V_{max}$  с высотой, оценим усредненные значения  $\langle n \rangle$ , как по высоте над каждой точкой ЛРП магнитного поля, так и вдоль всей ЛРП поля в каждой исследуемой АО (рис. 2). Оказалось, что за 1 ч до начала, связанной с быстрым КВМ вспышки,  $\langle n \rangle_{BF} = 1.83$ , для КВМ с промежуточной скоростью  $\langle n \rangle_{BF} = 1.56$ , для медленного –  $\langle n \rangle_{BF} = 1.50$ . Мы анализировали также поведение  $B_t(h)$  не только до начала вспышки, но и, спустя  $\sim 1$  ч после начала вспышки. После начала

связанной с выбросом массы вспышки сохранилась связь между  $\langle n \rangle$  и  $V_{\max}$ , аналогичная тому, какой она была до начала вспышки: после формирования быстрого КВМ  $\langle n \rangle_{AF} = 1.93$ , КВМ с промежуточной скоростью —  $\langle n \rangle_{AF} = 1.78$ , для медленного —  $\langle n \rangle_{AF} = 1.61$ . Но, при этом, быстрота спада поперечной компоненты магнитного поля, характеризующая  $\langle n \rangle$ , для всех рассмотренных событий после начала вспышки больше, чем до ее начала. Наиболее заметны эти различия для быстрого КВМ. Мы также рассмотрели изменения  $\langle n \rangle$  над ЛРП в пределах участков АО, где наблюдалась инициация каждого выброса массы. В АО NOAA 11429 над ЛРП в пределах участка формирования быстрого выброса массы  $\langle n \rangle_{BF} = 1.73$  за час до начала вспышки и  $\langle n \rangle_{AF} = 1.8$  спустя час после ее начала, для КВМ с промежуточной скоростью —  $\langle n \rangle_{BF} = 1.61$  и  $\langle n \rangle_{AF} = 1.66$ , для медленного —  $\langle n \rangle_{BF} = 1.36$  и  $\langle n \rangle_{AF} = 1.51$ , соответственно.

Как можно видеть, обнаруженное различие  $\langle n \rangle$  в двух случаях для трех отобранных событий, как до начала вспышки, так и после ее начала, относительно невелико. В связи с этим требуется провести в последующих работах дополнительный анализ, чтобы убедиться, что такое различие является значимым. Согласно нашим оценкам, среднеквадратический разброс значений  $n$  относительно среднего значения  $\langle n \rangle$  до начала вспышки составляет  $S_0 = 0.77$  для медленного КВМ,  $S_0 = 0.83$  — для КВМ с промежуточной скоростью, и  $S_0 = 0.99$  — для быстрого КВМ. Близкая ситуация оказывается после начала вспышки. Видно, что полученные значения  $\langle n \rangle$  для КВМ с заданной скоростью попадают в полосу среднеквадратического отклонения от среднего значения для событий с другими скоростями КВМ. Тем не менее, можно сделать, если не количественный, то качественный вывод, что, как до начала вспышки, связанной с каждым обсуждаемым КВМ, так и после начала вспышки, имеется положительный тренд между  $\langle n \rangle$  и  $V_{\max}$ ,  $V_{LIN}$  и  $V_{\max}$ : чем больше быстрота спада поперечной компоненты поля над ЛРП в АО, тем больше линейная и максимальная проекционная скорость КВМ.

Более надежно вывод о соотношении характеристики пространственного распределения  $n$  и скорости КВМ можно сделать, сравнив со скоростью коронального выброса массы интеграл  $n$  по времени в пределах заданного промежутка времени (интегральное значение), например, примерно одного часа до начала вспышки и одного часа после начала вспышки. В первом приближении такие интегральные значения ( $I_V$ ) равны при усреднении вдоль всей ЛРП:  $I_{V-BF} = 1.83 \cdot 1$  ч для

быстрого выброса массы,  $I_{V-BF} = 1.56 \cdot 1$  ч для промежуточного КВМ,  $I_{V-BF} = 1.50 \cdot 1$  ч для медленного КВМ до начала вспышки и  $I_{V-AF} = 1.93 \cdot 1$  ч,  $I_{V-AF} = 1.78 \cdot 1$  ч,  $I_{V-AF} = 1.61 \cdot 1$  ч после вспышки, соответственно. В этом случае полученные различия интегральных значений можно считать значимыми, т.к. необходимости сравнивать полученные интегральные значения со среднеквадратическим значением нет необходимости.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С использованием данных *SDO/AIA* с высоким временным и пространственным разрешением проанализированы особенности формирования КВМ с разными проекционными линейными скоростями в поле зрения коронографов *LASCO*: 2684, 950 и 459 км/с. Скорости КВМ сопоставлены также с быстротой изменения поперечной компоненты магнитного поля над ЛРП. Сделаны следующие выводы:

- Возникновение трех отобранных для анализа КВМ с разными скоростями включало практически одинаковые процессы: эрупцию волокна (или, в общем случае, эрупцию магнитного жгута), возникновение петлеобразных структур и, наконец, формирование фронтальной структуры выброса массы;

- Во всех рассмотренных случаях оказалось, что временной профиль скорости соответствует, так называемым “импульсным” КВМ, т.е. КВМ, скорость которых относительно быстро (обычно до выхода в поле зрения коронографа *LASCO C2*) достигает максимального значения, а затем уменьшается;

- С использованием по данным *SDO/HMI* расчетов магнитного поля в нелинейном бессиловом приближении над АО, в которых наблюдалось формирование исследуемых КВМ, были найдены изменения с высотой поперечной компоненты магнитного поля  $B_t(h)$  и быстроты спада поперечной компоненты поля  $n(h) = -\frac{h}{B_t} \cdot \frac{dB_t}{dh}$  над ЛРП магнитного поля (“decay-index”);

- Обнаружено, что линейная проекционная скорость КВМ  $V_{LIN}$ , а также максимум измеренной нами проекционной скорости КВМ  $V_{\max}$ , связаны положительным трендом с быстротой уменьшения  $B_t$  с высотой (для количественных оценок быстроты изменения  $B_t$  использовался “decay-index” (индекс спада)  $n(h)$ ) на нескольких выделенных нами интервалах высот (на малых высотах ( $h \leq 0.04R_S$ )), на промежуточных высотах (от  $h$ , где наблюдался локальный максимум на распределении  $n(h)$  до  $h < 0.13R_S$ ) и на больших высотах

( $h > 0.13R_S$ ): с ростом  $n$  значения  $V_{LIN}$  и  $V_{max}$  также увеличиваются;

– Выявлен положительный тренд, характеризующий связь значений  $V_{LIN}$  и  $V_{max}$  с  $\langle n \rangle$ , т.е. с усредненным “decay-index”, как по высоте, так и вдоль ЛРП магнитного поля как до начала связанной с КВМ вспышки, так и после ее начала. Положительный тренд характерен и для интегральных значений ( $I_V$ ) для “decay-index” (интеграл  $n$  по времени в течение одного часа до начала вспышки –  $I_{V-BF}$ , после начала –  $I_{V-AF}$ ): большим значениям  $I_V$  соответствуют большие значения  $V_{LIN}$  и  $V_{max}$ .

Авторы благодарят И.И. Мышьякова за расчеты компонентов магнитной индукции в NLFFF приближении. Авторы благодарят команды LASCO, SDO/AIA, SDO/HMI за возможность свободного использования данных этих инструментов. Мы также благодарны авторам каталога [https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\\_list/HALO/halo.html](https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/HALO/halo.html) за возможность использования приведенных в нем данных.

Работа выполнена в рамках базового финансирования программы ФНИ П.16.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Gopalswamy N., Yashiro S., Michalek G. et al.* The SOHO/LASCO CME Catalog // *Earth Moon Planet.* 2009. V. 104. P. 295–313.
2. *Chen P.F.* Coronal Mass Ejections: Models and Their Observational Basis // *Living Rev. Solar Phys.* 2011. V. 8. P. 1–92.
3. *Webb D.F., Howard T.A.* Coronal Mass Ejections: Observations // *Living Reviews in Solar Physics.* 2012. V. 9. Issue 1. P. 1–83.
4. *MacQueen R.M., Fisher R.R.* The kinematics of solar inner coronal transients // *Solar Phys.* 1983. V. 89. P. 89–102.
5. *Sheeley N.R., Jr., Walters J.H., Wang Y.-M., Howard R.A.* Continuous tracking of coronal outflows: Two kinds of coronal mass ejections // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104. P. 24767–24768.
6. *Vršnak B., Sudar D., Ruždjak D.* The CME-flare relationship: Are there really two types of CMEs? // *Astron. Astrophys.* 2005. V. 435. P. 1149–1157.
7. *Zhang J., Dere K.P.* A statistical study of main and residual accelerations of Coronal Mass Ejections // *Astrophys. J.* 2006. V. 649. P. 1100–1109.
8. *Török T., Kliem B.* Numerical simulations of fast and slow coronal mass ejections // *Astron. Nachricht.* 2007. V. 328. P. 743–746.
9. *Bateman G.* MHD Instabilities. Cambridge, Mass., MIT Press, 1978.
10. *Gopalswamy N., Dal Lago A., Yashiro S., Akiyama S.* The Expansion and Radial Speeds of Coronal Mass Ejections // *Central European Astrophysical Bulletin.* 2009. V. 33. P. 115–124.
11. *Lemen J.R., Title A.M. et al.* The atmospheric imaging assembly (AIA) on the solar dynamics observatory (SDO) // *Solar Phys.* 2012. V. 275. P. 17–40.
12. *Pesnell W.D., Thompson B.J., Chamberlin P.C.* The Solar Dynamics Observatory (SDO) // *Solar Phys.* 2012. V. 275. P. 3–15.
13. *Schou J., Scherrer P.H., Bush R.I et al.* Design and Ground Calibration of the Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) Instrument on the Solar Dynamics Observatory (SDO) // *Solar Phys.* 2012. V. 275. P. 229–259.
14. *Wheatland M.S., Sturrock P.A., Roumeliotis G.* An Optimization Approach to Reconstructing Force-free Fields // *Astrophys. J.* 2000. V. 540. P. 1150.
15. *Rudenko G.V., Myshyakov I.I.* Analysis of reconstruction methods for nonlinear force-free fields // *Solar Phys.* 2009. V. 257. P. 287–304.
16. *Fainshtein V.G., Egorov Ya.I.* Initiation of CMEs associated with filament eruption, and the nature of CME related shocks // *Advances in Space Res.* 2015. V. 55. P. 798–807.
17. *Grechnev V.V., Uralov A.M., Kochanov A.A. et al.* A tiny eruptive filament as a flux-rope progenitor and driver of a large-scale CME and wave // *Solar Phys.* 2016. V. 291. P. 1173–1208.
18. *Schmieder B., De'moulin P., Aulanier G.* Solar filament eruptions and their physical role in triggering coronal mass ejections // *Advances in Space Res.* 2013. V. 51. P. 1967–1980.
19. *Parenti S.* Solar Prominences: Observations // *Living Rev. Solar Phys.* 2014. V. 11. P. 1–88.