

О ВОЗМОЖНОМ РАЗЛИЧИИ В ФОРМИРОВАНИИ КОРОНАЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ МАССЫ ДВУХ ТИПОВ

POSSIBLE DIFFERENCE IN THE FORMATION OF CORONAL MASS EJECTIONS OF TWO TYPES

В.Г. Еселевич 

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, esel@iszf.irk.ru*

М.В. Еселевич 

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, mesel@iszf.irk.ru*

И.В. Зимовец 

*Институт космических исследований РАН,
Москва, Россия, ivanzim@iki.rssi.ru*

V.G. Eselevich

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, esel@iszf.irk.ru*

M.V. Eselevich

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, mesel@iszf.irk.ru*

I.V. Zimovets

*Space Research Institute RAS,
Moscow, Russia, ivanzim@iki.rssi.ru*

Аннотация. Анализ семи окололимитовых корональных выбросов массы (КВМ) показал, что на расстояниях $R < 1.4R_{\odot}$ от центра Солнца по характеру формирования КВМ можно разделить на два типа. В случае КВМ типа 1 формирование фронтальной структуры (FS) происходит за счет процессов, протекающих внутри самой FS, представляющей собой внешнюю оболочку магнитного жгута. В случае КВМ типа 2 происходит эрупция внутренних арочных структур, которые взрывообразно расширяются, захватывают и ускоряют окружающие более удаленные арочные структуры, в результате слияния которых и формируется фронтальная структура КВМ типа 2.

Ключевые слова: корональный выброс массы, магнитный жгут, корональные арочные структуры, вспышка, эруптивный протуберанец.

Abstract. Analysis of seven near-limb coronal mass ejections (CMEs) has shown that at distances $R < 1.4R_{\odot}$ from the center of the Sun CMEs according to their formation can be divided into two types: type 1 CMEs and type 2 CMEs. In the case of type 1 CMEs, the frontal structure (FS) is formed by processes occurring in FS itself, which is the outer shell of the magnetic flux rope. As for type 2 CMEs, EP-CME, internal arched structures erupt, explosively expand, capture and accelerate the more distant arched structures, which merge to form the frontal structure of the type 2 CMEs.

Keywords: coronal mass ejection, magnetic flux rope, coronal arched structures, flare, eruptive prominence.

ВВЕДЕНИЕ

Экспериментальные исследования и различные методы моделирования позволили достаточно надежно установить, что корональные выбросы массы (КВМ) представляют собой заполненный плазмой магнитный жгут, основания которого укоренены на фотосфере [Krall et al., 2000; Thernisien et al., 2009]. Внешняя оболочка жгута называется фронтальной структурой (FS) КВМ. Отметим, что магнитный жгут, являясь магнитной трубкой, имеет дополнительную компоненту магнитного поля, перпендикулярную основному продольному полю трубки.

В работе [Sheeley et al., 1999] по кинематическим характеристикам КВМ были разделены на две группы: постепенные (медленно эволюционирующие) и импульсные. Впервые такое разделение КВМ, но под другими названиями (eruption-associated и flare-associated), было сделано в [MacQueen, Fisher, 1983]. Согласно [Sheeley et al., 1999], постепенные КВМ

связаны с эрупцией протуберанцев и достигают максимальных скоростей $V_{\max} = 400\text{--}600$ км/с, а импульсные КВМ связаны с солнечными вспышками и имеют $V_{\max} > 750$ км/с.

Постепенные КВМ формируются в короне на высотах $0.1R_{\odot} < h < 1.0R_{\odot}$ (R_{\odot} — радиус Солнца) относительно поверхности Солнца. Они начинают движение из состояния покоя, имея угловой размер в диапазоне $15^{\circ}\text{--}65^{\circ}$ [Hundhausen, 1999; Sheeley et al., 1999; Vemporad et al., 2007; Eselevich, Eselevich, 2011]. В работе [Patsourakos et al., 2013] удалось впервые наблюдать и детально исследовать на лимбе развитие магнитного жгута постепенного КВМ (19 июля 2012 г.), образовавшегося над активной областью на малой высоте $h < 0.2R_{\odot}$ относительно поверхности Солнца. В результате этих исследований картина образования постепенных КВМ представляется следующей. В короне существует магнитный жгут, заполненный плазмой и укорененный основаниями в фотосфере. В результате развития

неустойчивости он может эруптировать, т. е. быть выброшенным в направлении от Солнца. Тип неустойчивости, приводящей к эрупции, и причины ее развития остаются до конца не ясными, несмотря на предложенные рядом исследователей механизмы [Antiochos et al., 1999; Amari et al., 2000; Magara, Longcope, 2001; Gibson et al., 2006; Archontis, Hood, 2008].

Вопрос о том, как происходит формирование магнитного жгута в короне перед эрупцией, до сих пор остается открытым. Одна из наиболее распространенных в настоящее время теорий объясняет его возникновение как результат так называемого tether-cutting магнитного пересоединения [Moore et al., 2001]. В ходе этого процесса система скрещенных магнитных петель с широким перемыкается над фотосферной линией инверсии магнитной полярности. Это приводит к формированию жгута и его последующей эрупции. Физической причиной служит увеличение полоидальной компоненты магнитного поля и уменьшение сдерживающего эффекта магнитного натяжения. Tether-cutting-модель подтверждается рядом наблюдений и численных расчетов (например, [Zhang et al., 2001; Sterling, Moore, 2005; Chen et al., 2014; Sharykin et al., 2020]). Обсуждается также возможность вклада в процесс эрупции изгибной (кинк) [Kliem et al., 2004; Shen et al., 2012] и тороидальной [Kliem, Török, 2006] неустойчивостей.

Согласно [Schmieder et al., 2013], более 80 % всех наблюдаемых эрупций солнечных волокон, которые фактически также являются магнитными жгутами, становятся триггерами КВМ.

Формирование импульсных КВМ может происходить либо вблизи поверхности Солнца, либо под фотосферой. Радиальная скорость таких магнитных жгутов вблизи фотосферы достигает десятков-сотен километров в секунду, а минимальный угловой размер составляет $\sim 1^\circ$ [Eselevich, Eselevich, 2011].

Предполагается, что одной из возможных причин их формирования может быть выброс из конвективной зоны магнитного жгута, заполненного относительно холодной плазмой. Такая возможность была предсказана в рамках теории тонкой магнитной трубки как результат развития неустойчивости медленной волны, или неустойчивости Паркера [Moreno-Inertis et al., 1992; Alekseenko et al., 2000; Романов и др., 1993a]. Основные качественные выводы теории и первое их сравнение с данными экспериментов приведены в статьях [Романов и др., 1993б; Еселевич и др., 2013; Еселевич, Еселевич, 2014]. Для прямого доказательства существования выброса магнитных трубок из конвективной зоны, формирующих КВМ этого типа, необходимы измерения магнитного поля Солнца с временным разрешением порядка 1–10 с, которые невозможно получить с помощью современных магнитографов: например, SDO/HMI и SOHO/MDI имеют разрешение порядка 1 мин.

Однако разделение КВМ на постепенные и импульсные не подтверждается статистическими исследованиями, анализирующими большое число со-

бытий [Vršnak et al., 2005; Zhang, Dere, 2006]. В частности, в статье [Vršnak et al., 2005] был проведен статистический анализ 545 КВМ, связанных со вспышками (flare associated CMEs, обозначены как F-CME или B-KBM), и 104 КВМ, связанных с эруптивными протуберанцами (disappearing filament CMEs, обозначены как DSF-CME или ЭП-KBM), наблюдавшихся на расстояниях $(2-30)R_\odot$ от центра Солнца. Было продемонстрировано, что оба набора данных дают довольно похожие характеристики, что противоречит концепции двух различных типов КВМ.

Возникает следующий вопрос: если разделения КВМ на постепенные (или ЭП-KBM) и импульсные (или B-KBM) не существует, то означает ли это, что все КВМ имеют одинаковый механизм формирования или существует разделение КВМ другого типа?

Данная работа является попыткой дать ответ на этот фундаментальный вопрос. С этой целью была рассмотрена динамика на стадии формирования этих КВМ двух типов, обозначенных нами как КВМ типа 1 и КВМ типа 2. На примере семи лимбовых КВМ проведен анализ зависимости максимальной скорости V_b лидирующей части КВМ, которая наблюдается в поле зрения инструмента SDO/AIA на расстояниях $R < 1.4R_\odot$ от центра Солнца, от характеристик (особенностей) начальной стадии формирования КВМ, и в первую очередь от расстояния R_b места формирования лидирующей части КВМ от центра Солнца.

1. ДАННЫЕ И МЕТОДЫ АНАЛИЗА

Для анализа большинства событий использовались ЭУФ-изображения в каналах 131, 193 и 1700 Å, полученные при помощи инструмента SDO/AIA [Lemen et al., 2012]. Каналы выбирались из соображений наилучшего отражения на изображениях начальной стадии формирования КВМ. Временной интервал между изображениями, получаемыми на SDO/AIA, ≈ 12 с, пространственное разрешение — 1.2" (два пикселя), что соответствует $0.00125R_\odot$. Поле зрения инструмента до $\approx 1.4R_\odot$.

Изображения в ЭУФ-каналах представлялись в виде изображений в разностной яркости с фиксированным начальным моментом времени

$$\Delta P = P(t) - P(t_0),$$

где $P(t_0)$ — невозмущенная яркость в момент t_0 до возникновения рассматриваемого события; $P(t)$ — возмущенная яркость в любой момент времени $t > t_0$. По разностным изображениям исследовалась динамика КВМ. Для этого строились распределения $\Delta P(R)$ относительно центра Солнца вдоль радиуса на фиксированном позиционном угле PA в различные моменты времени. Позиционный угол PA отсчитывается на изображениях Солнца от северного полюса против часовой стрелки. В отдельных случаях использовались изображения в бегущей разностной яркости $\Delta P_R = P(t_i) - P(t_{i-1})$, т. е. построенные на основе двух ближайших по времени изображений.

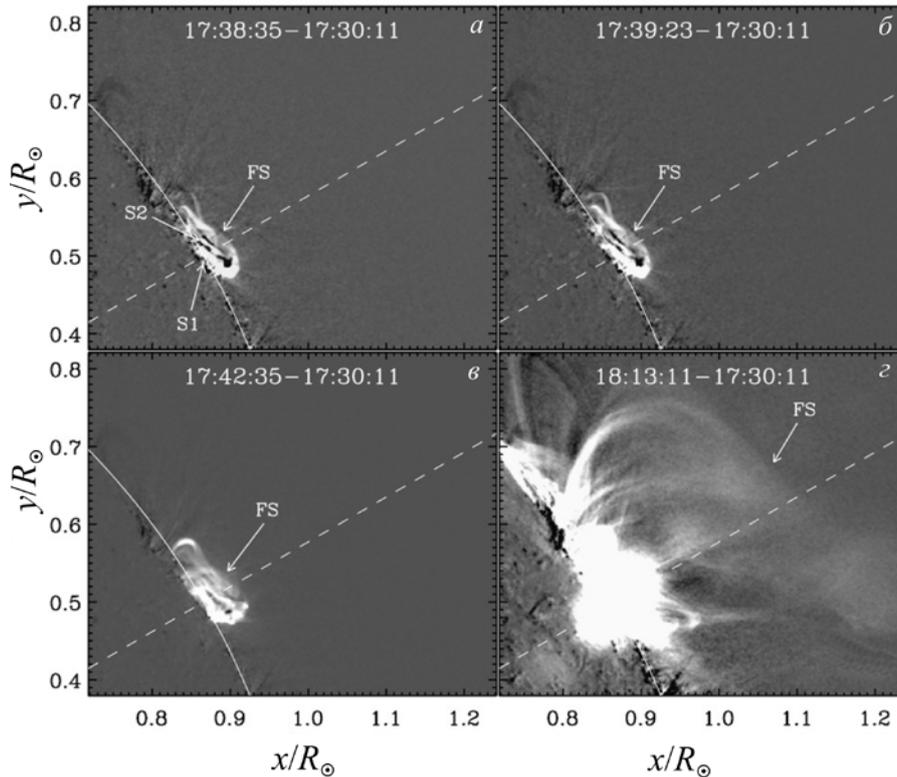


Рис. 1. Изображения в разностной яркости развития КВМ типа 1 для последовательных моментов времени 27 января 2012 г. (канал 131 Å, данные SDO/AIA). Положительный отсчет от центра Солнца по оси Y — на север, по оси X — на запад. Расстояния нормированы на радиус Солнца R_{\odot} . Штриховой линией показано направление $PA=300^{\circ}$

2. ЗАВИСИМОСТЬ СКОРОСТИ КВМ ТИПА 1 ОТ РАССТОЯНИЯ R_b , НА КОТОРОМ ПРОИСХОДИТ ФОРМИРОВАНИЕ ЛИДИРУЮЩЕЙ ЧАСТИ, ОТНОСИТЕЛЬНО ЦЕНТРА СОЛНЦА

В исследованиях будем опираться на отмеченное выше положение о том, что основой КВМ является магнитный жгут, основания которого укоренены на фотосфере. При этом будем использовать только лимбовые КВМ, возникшие на долготах $>75^{\circ}-80^{\circ}$. Будут проанализированы пять КВМ типа 1, в которых эрупция волокна либо отсутствует, либо носит второстепенный характер. Нас интересует, как максимальная скорость $V_{b\max}$ лидирующей части КВМ типа 1, наблюдаемая в поле зрения инструмента SDO/AIA на $R < 1.4R_{\odot}$ от центра Солнца, зависит от характеристик и особенностей начальной стадии формирования КВМ типа 1. К этим характеристикам относятся: местоположение R_{FS} относительно центра Солнца максимума разностной яркости ΔP_{FS} фронтальной структуры (FS) КВМ; интервал времени Δt_{FS} , в течение которого положение ΔP_{FS} остается неизменным; особенности динамики местоположения R_b и скорости V_b лидирующей части КВМ в пространстве и во времени. Кроме того, приведена линейно-усредненная по расстояниям $3R_{\odot} < R < 30R_{\odot}$ скорость V_{av} лидирующей части КВМ типа 1 по данным коронографов LASCO C2 и C3 [http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list].

Данные по пяти КВМ типа 1 приведены в таблице. Детально особенности формирования и развития КВМ типа 1 рассмотрим на примере событий 27.01.2012 и 19.07.2012. В первом случае формирование лидирующей части FS было максимально близко к поверхности Солнца, а во втором — максимально далеко от нее.

2.1. КВМ типа 1 в событии 27.01.2012

Рассмотрим КВМ типа 1 27.01.2012, формирование FS которого произошло максимально близко к поверхности Солнца. На рис. 1 представлены изображения в разностной яркости (при $t_0=17:30:11$ UT) развития данного КВМ в горячем ($T \approx 10^7$ K) канале 131 Å для последовательных моментов времени. В этом канале наиболее четко просматривается начальная стадия развития события, которое произошло в активной области NOAA 11402 и сопровождалось рентгеновской вспышкой балла X1.7 с гелиографическими координатами N29W86, начавшейся в $\approx 17:37$ UT. В 17:38:35 и 17:39:23 UT (рис. 1, a, б) видны внешняя арочная структура, являющаяся основой будущей фронтальной структуры FS, и две внутренние структуры S1 и S2, расположенные ниже.

Согласно рис. 11 из работы [Patsourakos et al., 2013], в трехмерном виде наблюдаемый набор петлеобразных структур в плоскости неба представляет собой магнитный жгут, заполненный собой плазмой, основания которого укоренены на фотосфере. В результате развития неустойчивости жгут может эруптировать. Со временем яркость структур

Дата и время (UT) максимума вспышки в мягком рентгене	Гелиографические координаты и балл вспышки	Линейно-усредненная скорость КВМ V_{av} , км/с	R_b/R_\odot	R_{FS}/R_\odot	Δt_{FS} , мин	$V_b \text{ макс. км/с}$ (R_b/R_\odot)	Влияние эрупции протуберанца
23.06.2012 07:50	N14W89 C2.7	1263	1.105	1.097	8	377 (1.34)	нет
19.07.2012 05:58	S13W88 M7.7	1631	1.213	1.187	10	102 (1.267)	нет
22.09.2011 11:01	N09E89 X1.4	1905	1.09	1.083	5	526 (1.27)	нет
27.01.2012 18:37	N29W86 X1.7	2508	1.037	1.028	4	680 (1.33)	нет
10.09.2017 16:06	S08W88 X8.2	3163	1.024	1.019	1	928 (1.245)	нет
24.08.2014 12:17	S07E78 M5.9	551	1.22	1.19	<1	550 (1.25)	есть
25.02.2014 00:49	S12E82 X4.9	2147	1.165	1.157	3.5 ± 1	2030 (1.24)	есть

S1 и S2 и FS усиливается. После 17:39:23 UT (рис. 1, б) начинается движение FS от Солнца, т. е. начинается процесс эрупции (рис. 1, в, з).

Хотя в месте вспышки имеется засветка ПЗС-матриц AIA/SDO и искажение величины яркости, тем не менее можно попытаться проанализировать динамику этого события. С этой целью были построены распределения разностной яркости $\Delta P = P(t) - P(t_0)$ (при $t_0 = 17:30:11$ UT) в зависимости от расстояния R от центра Солнца (рис. 2). Распределения строились в направлении позиционного угла $PA = 300^\circ$. На рис. 2, а видно, что между 17:33:47 (светлые кружки) и 17:38:59 UT (темные кружки) разностная яркость структур S1, S2 и FS увеличивается, достигая значений $\Delta P_1, \Delta P_2, \Delta P_{FS}$ соответственно. При этом их положения остаются неизменными. Нас будет интересовать — в первую очередь — последующая динамика будущей фронтальной структуры FS.

Введем определения нескольких параметров, которые в дальнейшем будут использоваться (рис. 2), а именно:

- 1) положение R_{FS} максимума разностной яркости ΔP_{FS} ;
- 2) положение R_b лидирующей части (ЛЧ) фронтальной структуры FS, которое определяется пересечением с осью R прямой, аппроксимирующей точки фронта FS.

Кроме того, нас будет интересовать интервал времени Δt_{FS} , в течение которого начальное положение $R_{FS} = 1.028R_\odot$ максимума ΔP_{FS} остается неизменным. Согласно рис. 2, б, $\Delta t_{FS} \approx 4 \pm 1$ мин. После 17:40:11 UT (светлые треугольники) начинается движение FS (см. следующий момент 17:40:35 UT (ромбики) и далее на рис. 2, в).

Начальное положение лидирующей части FS $R_b = 1.037R_\odot$ (крестики на рис. 2, а). Положение лидирующей части начинает меняться раньше, чем R_{FS} , после 17:36:35 UT (черные кружки на рис. 2, а). Очевидно, что движения точек R_{FS} и R_b связаны с процессами внутри арочной структуры FS. При этом до $\approx 17:40:11$ UT смещение R_b отражает уширение структуры, в то время как движение точки R_{FS} после 17:40:11 UT — смещение FS как целого.

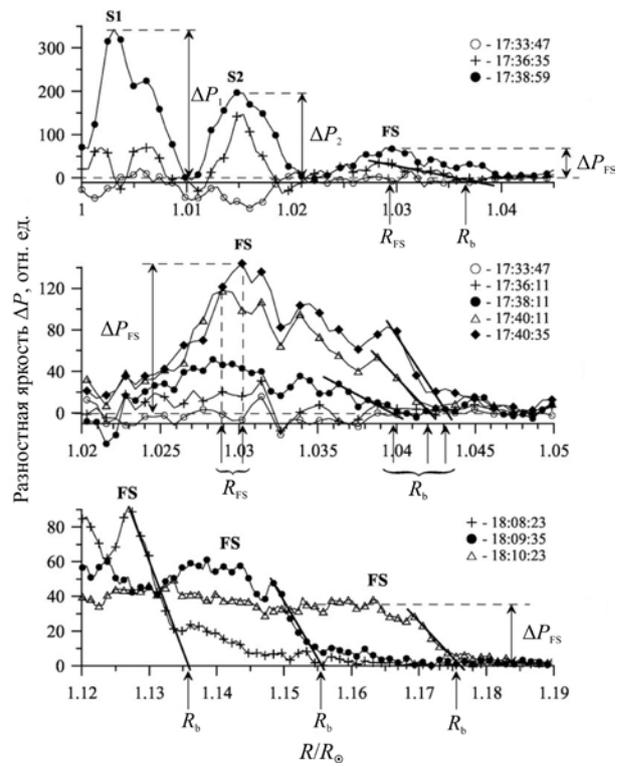


Рис. 2. Распределения разностной яркости $\Delta P(R)$ в канале 131 \AA при $t_0 = 17:30:11$ UT, построенные в направлении $PA = 300^\circ$ (штриховая линия на рис. 1) для последовательных моментов времени 27.01.2012. По данным SDO/AIA

Кинематические зависимости $R(t)$ для структур S1, S2 и фронтальной структуры $R_{FS}(t), R_b(t)$, построенные по распределениям $\Delta P(R)$ для различных последовательных моментов времени (см. рис. 2), показаны на рис. 3, а. Видно, что структуры S1 (черные треугольники) и S2 (крестики) все время развития процесса вплоть до 18:10 UT хотя и немного колеблются, но в целом остаются практически неподвижными. Положение максимума ΔP_{FS} фронтальной структуры, как уже отмечалось выше, в течение $t \approx 4$ мин (показано двумя вертикальными стрелками на рис. 3, б) остается неизменным: $R_{FS} = 1.028R_\odot$. При этом положение R_b лидирующей

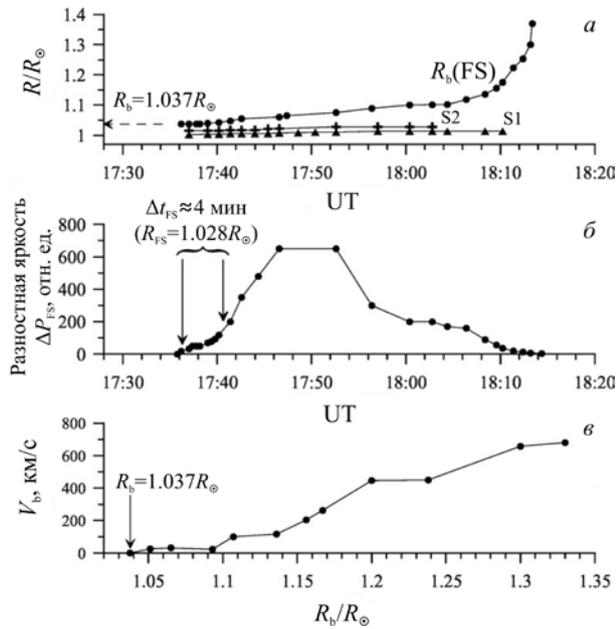


Рис. 3. Зависимости от времени: *a* — положений R относительно центра Солнца структур S1 (черные треугольники), S2 (крестики), положения R_b лидирующей части FS (черные кружки); *б* — величины максимума разностной яркости ΔP_{FS} FS, двумя вертикальными стрелками отмечен интервал времени Δt_{FS} , в течение которого положение $R_{FS}=1.028R_{\odot}$ остается неизменным; *в* — зависимость скорости лидирующей части FS от ее расстояния R_b от Солнца, вертикальной стрелкой показано начальное положение R_b покоящейся лидирующей части FS. Данные AIA/SDO: канал 131 Å, 27 января 2012 г.

части FS (черные кружки) начинает меняться еще раньше, сразу после 17:40 UT, и после 18:10 UT скорость изменений резко увеличивается. При этом разностная яркость ΔP_{FS} сначала возрастает, а затем, после 17:55 UT, начинает быстро падать. Наибольший спад ΔP_{FS} происходит после 18:05 UT (рис. 3, б) на участке максимального ускорения FS (рис. 3, а).

На рис. 3, в приведен график скорости $V_b(R)$, рассчитанной по формуле $V_b(R) = (R_b(t_{i+1}) - R_b(t_i)) / (t_{i+1} - t_i)$ с использованием зависимости $R_b(t)$ (см. рис. 3, а). Здесь в числителе — разность между соседними точками по оси ординат на рис. 3, а, в знаменателе — временной интервал между ними. Как видно на рис. 3, в, после постепенного возрастания скорости от нулевого значения заметное ускорение лидирующей части происходит на расстояниях $R \geq 1.1R_{\odot}$ (при $t \geq 18:10$ UT на рис. 3, а) и достигает максимального значения $V_{b \max} \approx 680$ км/с в поле зрения инструмента SDO/AIA ($R \approx 1.35R_{\odot}$). При этом средняя скорость лидирующей части этого КВМ типа 1 на расстояниях $R \approx (2-3)R_{\odot}$ составила $V_{av} \approx 2509$ км/с (см. таблицу по данным [http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list]).

Все это свидетельствует о том, что основные процессы, вызывающие формирование рассматриваемого КВМ типа 1, протекают главным образом во внешней оболочке FS.

2.2. КВМ типа 1 в событии 19.07.2012

Рассмотрим КВМ типа 1, формирование FS которого происходит, в отличие от КВМ 27.01.2012, на максимальном расстоянии от поверхности Солнца, доступном наблюдению SDO/AIA. Это событие

произошло 19.07.2012 в активной области NOAA 11520 и сопровождалось вспышкой рентгеновского балла M7.7 с координатами S13W88, начавшейся в $\approx 04:20$ UT.

На рис. 4 представлены изображения в разностной яркости (при $t_0=04:15:10$ UT) развития этого В-КВМ для последовательных моментов времени. Так же как и для КВМ 27.01.2012, нами использованы изображения в канале 131 Å, поскольку в нем наиболее четко просматривается развитие КВМ 19.07.2012 на начальной стадии.

Из рис. 4, а–в следует, что к 04:25:22 UT сначала становятся видимыми две арочные структуры S1 и S2, а к 04:32:22 и 04:45:46 UT кроме них становится видна и внешняя часть FS (см. рис. 4, б, в), являющаяся основой будущей фронтальной структуры КВМ типа 1. Весь набор этих структур может представлять собой поперечное сечение трехмерного магнитного жгута, заполненного плазмой, основания которого укоренены в фотосфере [Patsourakos et al., 2013]. Со временем яркость S1, S2 и FS усиливается. После 04:45:46 UT (рис. 4, в) начинается движение FS от Солнца, или эрупция волокна.

Для исследования динамики этого события были построены распределения разностной яркости ΔP (при $t_0=04:15:10$ UT) в зависимости от расстояния R от центра Солнца для ряда последовательных моментов времени (рис. 5). Распределения строились в направлении позиционного угла $PA=265.5^\circ$.

На рис. 5, а, б видно, что между 04:33:10 (светлые кружки) и 04:39:58 UT (темные кружки) разностная яркость структур S1, S2 и FS увеличивается, достигая значений ΔP_1 , ΔP_2 , ΔP_{FS} соответственно, при этом их положения остаются практически неизменными. Как и в событии 27.01.2012, нас интересует в первую очередь динамика будущей фронтальной структуры FS. На рис. 5, в показаны начальные положения $R_{FS}=1.187R_{\odot}$ максимума разностной яркости ΔP_{FS} и $R_b=1.213R_{\odot}$ лидирующей части FS. Из рис. 5, в следует, что между 04:30:46 (светлые кружки) и 04:39:58 UT (крестики) R_{FS} остается неизменным, поэтому можно считать (с точностью до одной минуты), что $\Delta t_{FS} \approx 10 \pm 1$ мин.

После 04:39:58 UT начинается движение FS (см. следующий момент 04:42:22 UT (светлые треугольники) и далее (черные треугольники)). Положение лидирующей части FS (крестики на рис. 5, в) начинает меняться примерно в то же время, что и положение максимума FS, т. е. после 04:39:58 UT. Таким образом, фронтальная структура FS начинает движение как целое. Очевидно, что движение точек R_{FS} и R_b связано с процессами, протекающими внутри арочной структуры FS.

Кинематические зависимости $R(t)$ для структур S1, S2 и лидирующей части FS $R_b(t)$, построенные по распределениям $\Delta P(R)$ для различных последовательных моментов времени (см. рис. 5), показаны на рис. 6, а. Зависимость максимума разностной яркости ΔP_{FS} от времени приведена на рис. 6, б. Зависимость от расстояния скорости $V_b(R)$ лидирующей части FS, построенная с использованием зависимости $R_b(t)$ (рис. 6, а) по приведенной в разделе 2.1 формуле, представлена на рис. 6, в.

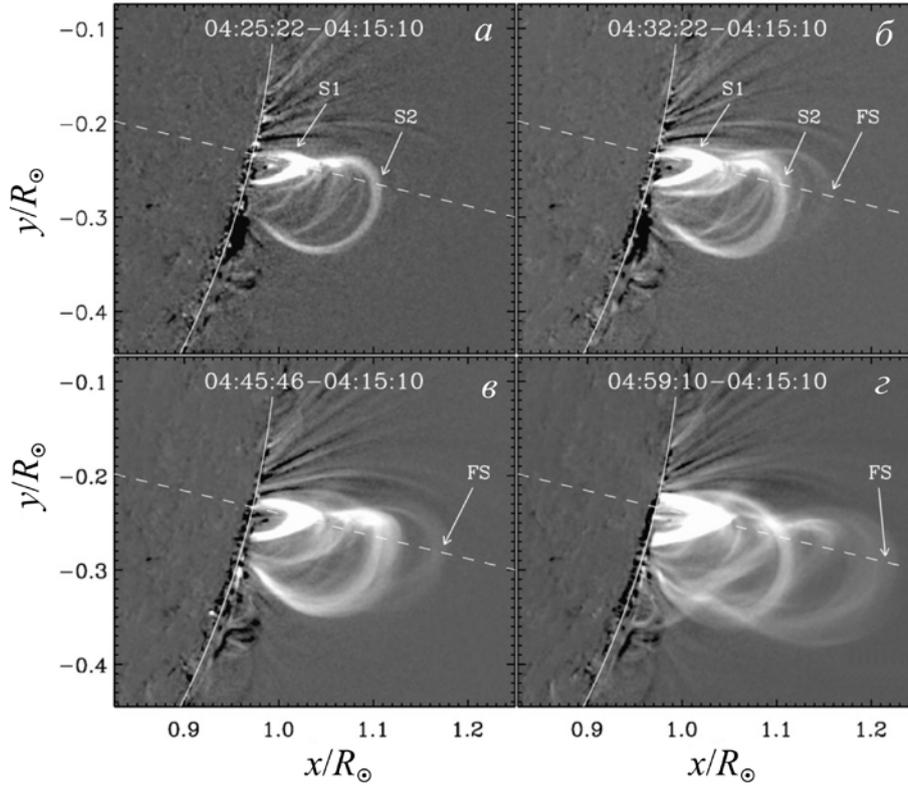


Рис. 4. Изображения в разностной яркости развития КВМ типа 1 для последовательных моментов времени 19 июля 2012 г. (по данным SDO/AIA в канале 131 Å). Положительный отсчет от центра Солнца по оси Y — на север, по оси X — на запад. Расстояния нормированы на радиус Солнца R_{\odot} . Штриховой линией показано направление $PA=256.5^{\circ}$

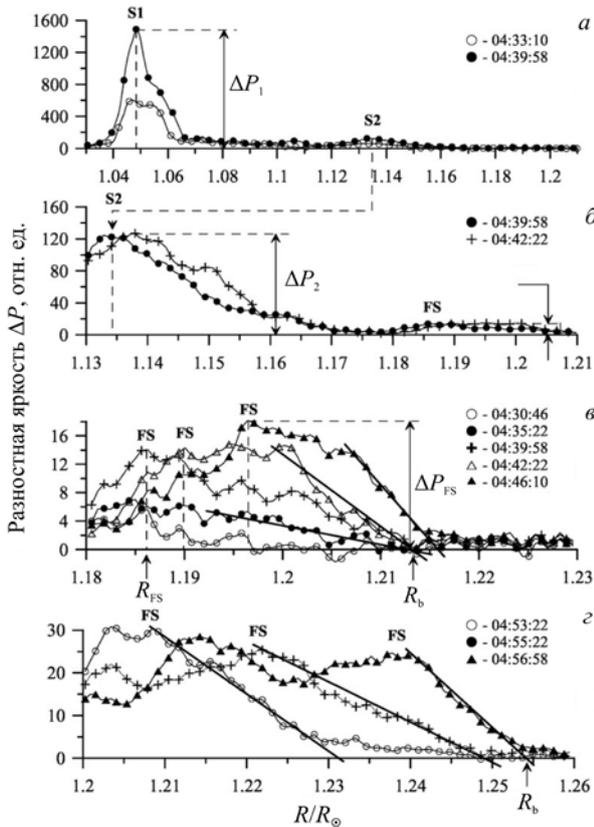


Рис. 5. Распределения разностной яркости $\Delta P(R)$ в канале 131 Å при $t_0=04:15:10$ UT, построенные в направлении $PA=256.5^{\circ}$ (штриховая прямая на рис. 4) для последовательных моментов времени 19.07.2012 (по данным SDO/AIA)

Сравним эти зависимости для КВМ типа 1 19.07.2012 (рис. 6) и 27.01.2012 (рис. 3). Что в них общее и в чем различия? Общими в этих событиях являются:

- 1) практическая неизменность положений внутренних структур S1 (черные треугольники), S2 (крестики) на всем протяжении развития процесса;
- 2) ускорение и, соответственно, эрупция только внешней арочной структуры FS, которая становится затем основой будущей фронтальной структуры КВМ типа 1;
- 3) существование до начала ускорения внешней структуры FS интервала времени Δt_{FS} , в течение которого максимальная яркость ΔP_{FS} структуры возрастает, а положение R_{FS} остается практически неизменным.

Главные отличия этих событий:

1. Начальные положения максимума разностной яркости ΔP_{FS} и лидирующей части FS в событии 19.07.2012 $R_{FS}=1.187R_{\odot}$ и $R_b=1.213R_{\odot}$ соответственно. В событии 27.01.2012 эти начальные положения были заметно ближе к Солнцу: $R_{FS}=1.027R_{\odot}$ и $R_b=1.037R_{\odot}$ (см. рис. 6, б, в).
2. Интервал времени Δt_{FS} , в течение которого при усиливающейся яркости структура FS остается неподвижной, для КВМ 19.07.2012 составляет $\approx 10 \pm 1$ мин (см. рис. 6, б). Для КВМ 27.01.2012 Δt_{FS} меньше более чем в два раза и составляет 4 ± 1 мин.
3. Максимальная скорость $V_{b \max}$ лидирующей части, зарегистрированная в поле зрения инструмента SDO/AIA, составила ≈ 102 для КВМ 19.07.2012 и ≈ 680 км/с для КВМ 27.01.2012 (см. таблицу).

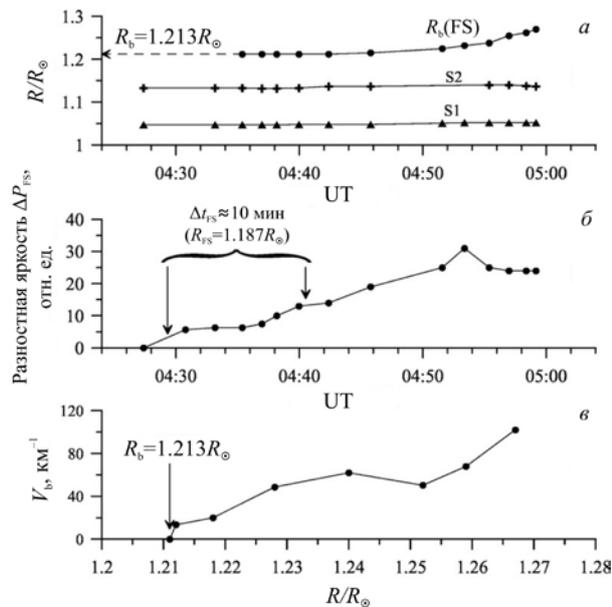


Рис. 6. Зависимости от времени: а — положений R и R_b относительно центра Солнца структур S1 (черные треугольники) и S2 (крестики) и лидирующей части FS (черные кружки); б — величины максимума разностной яркости ΔP_{FS} фронтальной структуры FS; двумя вертикальными стрелками отмечен интервал времени Δt_{FS} , в течение которого положение $R_{FS} = 1.187R_{\odot}$ остается неизменным; в — зависимость скорости лидирующей части FS от ее расстояния R_b от Солнца; вертикальной стрелкой показано начальное положение R_b лидирующей части FS. Данные AIA/SDO, канал 131 Å, 19 июля 2012 г.

4. Средняя (линейно-усредненная) скорость V_{av} лидирующей части на расстояниях $R \approx (2-30)R_{\odot}$ составила ≈ 1630 для КВМ 19.07.2012 и ≈ 2509 км/с для КВМ 27.01.2012 (см. таблицу).

Кроме представленных выше КВМ, мы исследовали аналогичным способом еще три лимбовых КВМ типа 1 (В-КВМ). Это события 22.09.2011, 10.09.2017, 23.06.2012, данные о которых представлены в таблице. Начальные положения R_{FS} и R_b для этих КВМ были промежуточными между значениями для КВМ 19.07.2012 и 27.01.2012. Как уже отмечалось выше, внешняя арочная структура FS лимбовых КВМ типа 1 является внешней границей поперечного сечения магнитного жгута, основания которого укоренены на фотосфере. При этом арочные структуры типа S1, S2 и т. д. внутри FS, если они присутствуют, могут как представлять собой составную часть сечения магнитного жгута, так и находиться рядом с областью выброса и проецироваться на общий участок плоскости лимба.

В рассмотренных трех КВМ типа 1 количество этих структур было различно: 0 — в событии 23.06.2012, 2 — в событии 10.09.2017 и 5 — в событии 22.09.2011. Эти различия внутреннего сечения магнитного жгута связаны с особенностями активной области, над/в которой он сформирован, и кардинально на процесс эрупции внешней структуры FS не влияют.

2.3. Обобщение свойств КВМ типа 1

Обобщающие графики (рис. 7), построенные для пяти В-КВМ (черные кружки), позволяют сделать ряд выводов о некоторых их общих свойствах.

Прежде всего, из рис. 7, а следует, что максимальная скорость $V_{b \max}$ лидирующей части КВМ типа 1 (черные кружки), которая достигается в поле зрения инструмента SDO/AIA (т. е. на $R < 1.4R_{\odot}$), тем больше, чем ближе к поверхности Солнца происходит формирование КВМ. Эта зависимость однозначно опровергает существовавшее ранее разделение КВМ на импульсные и постепенные, формирование которых в короне должно происходить на расстояниях $R > 1.1R_{\odot}$ от центра Солнца [Sheeley et al., 1999]. Однако на примере пяти рассмотренных событий, отнесенных нами к КВМ типа 1, можно сделать заключение о единой картине их возникновения. Отметим, что для рассмотренных событий средняя скорость V_{av} на расстояниях $2R_{\odot} < R < 30R_{\odot}$ по данным коронографов LASCO C2 и C3 [http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list] также в среднем тем больше, чем ниже формируется КВМ типа 1 (таблица, столбцы 3 и 4).

Чем ближе к поверхности Солнца происходит формирование КВМ типа 1, тем быстрее он формируется, т. е. тем меньше интервал времени Δt_{FS} (рис. 7, в) и тем больше максимальная скорость $V_{b \max}$ лидирующей части FS на $R < 1.4R_{\odot}$ (рис. 7, б).

3. ЗАВИСИМОСТЬ СКОРОСТИ КВМ ТИПА 2 ОТ РАССТОЯНИЯ, НА КОТОРОМ ПРОИСХОДИТ ФОРМИРОВАНИЕ ЕГО ЛИДИРУЮЩЕЙ ЧАСТИ

Проведем аналогичный анализ для двух лимбовых КВМ другого типа, а именно КВМ, связанных с эруптивными протуберанцами, или КВМ типа 2. Сделаем это на примере событий 24 августа 2014 г. и 25 февраля 2014 г., которые ранее были детально проанализированы в статье [Еселевич и др., 2016; Еселевич, Еселевич, 2020]. Под эруптивным протуберанцем мы подразумеваем магнитный жгут с ядром из холодной ($T < 6000-10000$ К) плазмы, который до начала события покоился над фотосферой. При этом возможны два следующих его варианта:

1. Активный протуберанец, который представляет собой магнитный жгут в активной области и до начала в нем процесса активизации остается невидимым. С началом активизации яркость жгута возрастает, и он становится видимым, в первую очередь в холодных каналах 6562.8 (H α), 1700, 304 Å и т. д., а также в некоторых более горячих каналах (193 Å и т. д.), и затем эруптирует.

2. Обычный протуберанец, который до начала процесса активизации видим на диске Солнца в канале 6562.8 Å (H α) как область пониженной яркости и представляет собой магнитный жгут с плазмой при $T < 6000-10000$ К. С началом активизации его яркость также возрастает во всех указанных выше каналах, а затем он эруптирует.

К случаю 1 относится КВМ 24 августа 2014 г., а к случаю 2 — КВМ 25 февраля 2014 г. Оба события будем обозначать как КВМ типа 2, т. е. связанные с эруптивным протуберанцем. Поскольку суть обоих КВМ типа 2 одинакова, а сами события детально были ранее проанализированы в работах [Еселевич

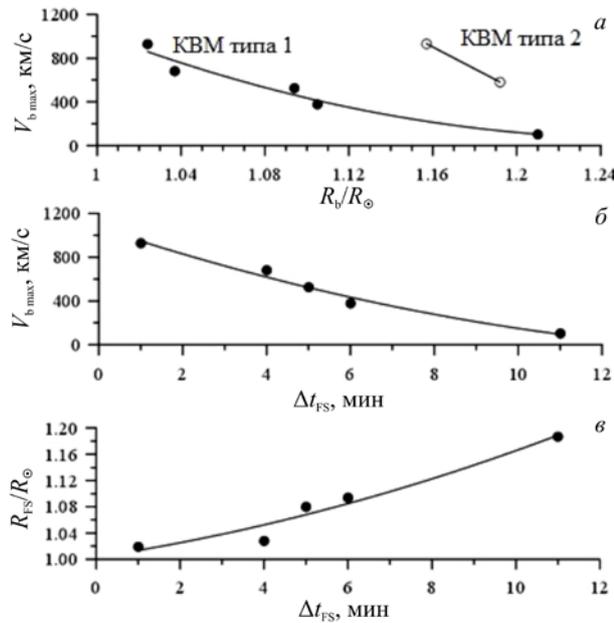


Рис. 7. Зависимости максимальной скорости $V_{b \max}$ лидирующей части КВМ типа 1 (черные кружки) и КВМ типа 2, связанных с эруптивными протуберанцами (светлые кружки), зарегистрированных в поле зрения инструмента SDO/AIA, от начального положения R_b/R_\odot лидирующей части FS (а) и от интервала времени Δt_{FS} , в течение которого структура FS остается неподвижной (б). Зависимость положения R_{FS} максимума разностной яркости ΔP_{FS} от интервала времени Δt_{FS} (в). Экспериментальные точки аппроксимированы параболой

и др., 2016; Еселевич, Еселевич, 2020], то для иллюстрации различий и причин разделения на КВМ типа 1 и КВМ типа 2 кратко рассмотрим здесь только событие 24.08.2014.

3.1. КВМ типа 2 в событии 24.08.2014

Рассматриваемый КВМ типа 2 произошел в активной области NOAA 12151 с координатами S07 и >E60 и сопровождался вспышкой класса M5.9 с началом в $\approx 12:00$ UT и гелиографическими координатами S07E78. Таким образом, 24.08.2014 КВМ типа 2 располагался на видимой части диска близко к лимбу.

Проведем краткое сравнительное рассмотрение динамики КВМ типа 2 по изображениям в бегущей разностной яркости в холодном канале 1700 \AA ($T \approx 5 \cdot 10^3 \text{ K}$) и более горячем канале 193 \AA (с двумя температурными максимумами $T \approx 1.6 \cdot 10^6 \text{ K}$ и $\approx 2 \cdot 10^7 \text{ K}$). Более детально развитие данного КВМ ранее было проанализировано в статье [Еселевич и др., 2016].

В канале 1700 \AA с $12:08:07$ UT (рис. 8, а–з) наблюдается появление вблизи поверхности Солнца и движение примерно вдоль радиального направления расширяющейся яркой арочной структуры (оболочки, охватывающей полость. Согласно анализу в статье [Еселевич и др., 2016], эта арочная структура представляет собой характерное поперечное сечение магнитного жгута, заполненного холодной плазмой ($T < 6000 \text{ K}$). Жгут первоначально был невидим и располагался вблизи фотосферы на высоте 400–600 км, соответствующей минимальной темпе-

ратуре фотосферной плазмы. На рис. 8, а–з жгут обозначен EP — eruptive prominence (эруптивный протуберанец).

На рис. 8, д–з приведены изображения в бегущей разностной яркости в горячем канале 193 \AA для четырех последовательных моментов времени, отражающие развитие данного события. Штриховой линией показан позиционный угол $PA=101^\circ$. Принципиальным различием между развитием выброса в горячем канале 193 \AA и холодном канале 1700 \AA является существование двух взаимосвязанных процессов, имеющих разные места локализации. Первый процесс начинается после $\approx 12:08:07$ UT 24 августа 2014 г. и связан с усилением яркости вблизи поверхности Солнца и эрупцией протуберанца EP, рассмотренного выше по данным в канале 1700 \AA . Второй процесс начинается почти одновременно с началом формирования EP, но на большем расстоянии от Солнца. На изображениях рис. 8, е–з он проявляется как усиление яркости нескольких вложенных друг в друга арочных структур большего, чем EP, масштаба. Набор этих структур условно обозначен как S1 на рис. 8, е. На рис. 8, ж к ним добавляется ставшая видимой из-за усиления яркости более удаленная структура S2. Эти структуры представляют собой внутреннее поперечное сечение магнитного жгута большего размера, чем EP, основания которого укоренены на фотосфере на краю AO 12151, аналогично наблюдавшемуся в работе [Patsourakos et al., 2013].

Для более детального рассмотрения формирования арочных структур и их динамики на рис. 9 представлены распределения бегущей разностной яркости $\Delta P_R(R)$ в канале 193 \AA , построенные в направлении позиционного угла $PA \approx 101^\circ$ для последовательных моментов времени. Последовательность кривых слева на рис. 9, а–в отражает динамику во времени EP, максимум яркости ΔP_{\max} которого отмечен вертикальной стрелкой с надписью EP. Положение $R_b(EP)$ лидирующей части EP определяется пересечением с осью R прямой, усредняющей фронт EP (рис. 9, а–в).

Динамика EP в холодном канале 1700 \AA (здесь не приводится) выглядит примерно также. Это связано с тем, что при движении EP его внешняя оболочка (или лидирующая часть) прогревается более сильно, чем внутренняя часть (т. е. становится видимой в канале 193 \AA), и они движутся как единое целое (см. рис. 3 в статье [Еселевич и др., 2016]).

Из рис. 9, а видно, что максимальное значение яркости ΔP_{\max} EP сначала растет, а положение максимума смещается в радиальном направлении. Затем, после $12:11:07$ UT, максимальное значение яркости начинает резко уменьшаться (см. рис. 9, в, черные кружки и крестики). Как было показано в [Еселевич и др., 2016], здесь имеет место взрывообразное расширение EP, при котором он догоняет, захватывает и ускоряет расположенные на его пути арочные структуры больших размеров.

Этот процесс в итоге приводит к формированию фронтальной структуры FS ЭП-КВМ. Конечная стадия формирования FS определяется динамикой структур S1 и S2 (см. рис. 9, д, крестики), слияние которых видно на рис. 9, е (светлые кружки). При этом основой

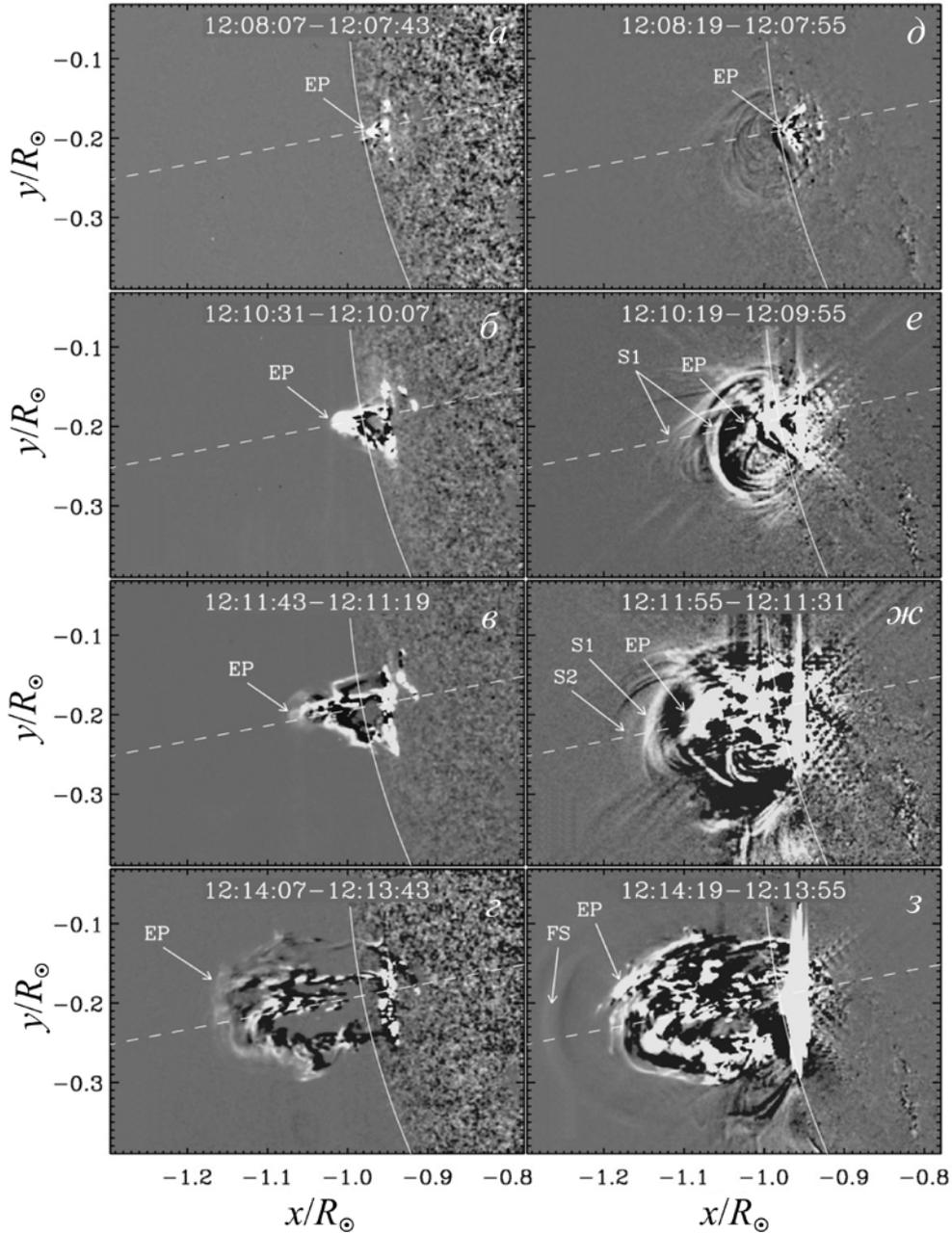


Рис. 8. Разностные изображения развития КВМ типа 2 в последовательные моменты времени в каналах 1700 Å (a–z) и 193 Å (d–z) по данным SDO/AIA. Событие 24 августа 2014 г.

будущей FS КВМ типа 2 становится S2, максимум яркости которой в момент появления был расположен на $R_{\max}(S2) \approx 1.193R_{\odot}$ (крестики на рис. 9, d).

Таким образом, при наблюдении вблизи лимба Солнца процесс формирования КВМ типа 2, в отличие от процесса формирования КВМ типа 1, имеет следующие две стадии:

1) выброс и взрывообразное расширение протуберанца (содержащего холодную плазму и внешнюю оболочку с разреженной и более прогретой плазмой), поперечное сечение которого на лимбе наблюдается в виде набора арочных структур;

2) ускорение под действием расширяющегося протуберанца окружающих арочных структур (заполненных более горячей плазмой), являющихся поперечным сечением магнитных жгутов, и их сли-

яние с последующим формированием будущей фронтальной структуры КВМ типа 2.

Аналогичным образом процесс развивается и в событии 25 февраля 2014 г. [Еселевич, Еселевич, 2020].

Зависимость $V_b(R_b)$ лидирующей части КВМ типа 2 для этих событий показана на рис. 7, a светлыми кружками. При этом лидирующая часть КВМ типа 2, формирующихся достаточно близко к поверхности Солнца на $R_b/R_{\odot} \approx 1.165$, может на больших расстояниях $R \approx (2-30)R_{\odot}$ иметь средние скорости V_{av} , сравнимые со скоростями КВМ типа 1 на этих расстояниях (см. столбец 3 в табл. 1 для событий 22.09.2011, 27.01.2012, 25.02.2014). Из таблицы (ср. столбцы 3 и 7) также можно видеть, что рассмотренные КВМ типа 2 практически заканчивают уско-

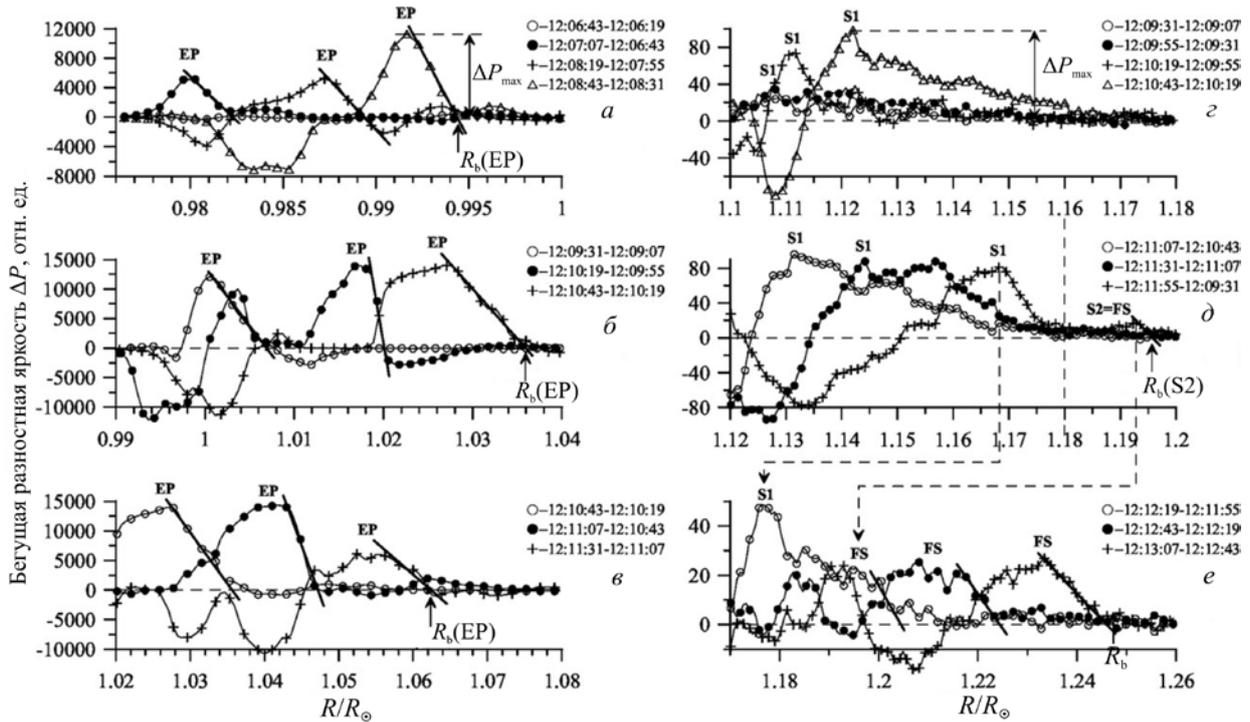


Рис. 9. Распределения бегущей разностной яркости $\Delta P_R(R)$ в канале 193 \AA , построенные в направлении $PA=101^\circ$ (штриховая линия от центра Солнца на рис. 8) для последовательных моментов времени 24.08.2014 г.: а-в — для эруптивного протуберанца EP вблизи поверхности Солнца; г-е — для арочных структур в короне Солнца, слияние которых приводит к формированию FS данного KBM типа 2 (по данным SDO/AIA)

рение на расстояниях $R < 1.22R_\odot$, тогда как KBM типа 1 продолжают набирать скорость вне поля зрения SDO/AIA (на $R > \sim 1.2R_\odot$).

ВЫВОДЫ

Анализ семи лимбовых KBM показал, что по особенностям развития на расстояниях $R < 1.4R_\odot$ от центра Солнца KBM можно разделить на два типа. Особенности формирования KBM данных типов заключаются в следующем.

1. В случае KBM типа 1 формирование фронтальной структуры происходит за счет процессов, протекающих внутри самой FS, представляющей собой внешнюю оболочку магнитного жгута. При этом отсутствует воздействие внутренних арочных структур магнитного жгута на формирование FS.

2. Чем ближе к поверхности Солнца происходит формирование KBM типа 1, тем быстрее оно идет и тем больше максимальная скорость $V_{b \text{ max}}$ лидирующей части KBM, достигаемая в поле зрения инструмента SDO/AIA (т. е. на $R < 1.4R_\odot$).

3. В случае KBM типа 2 происходит эрупция внутренних арочных структур, которые взрывообразно расширяются, захватывают и ускоряют окружающие более удаленные арочные структуры, в результате слияния которых формируется фронтальная структура KBM типа 2.

4. На больших расстояниях $R \approx (2-30)R_\odot$ KBM типа 1 и KBM типа 2 имеют сравнимые средние скорости V_{av} .

Полученные результаты опровергают существовавшее ранее разделение KBM на импульсные и постепенные [Sheeley et al., 1999], формирование

фронтальной структуры которых в короне должно происходить на расстояниях $R > 1.1R_\odot$ от центра Солнца.

Отметим, что и KBM типа 1, и KBM типа 2 сопровождаются солнечными вспышками — возрастанием потоков электромагнитного (в частности, рентгеновского) излучения. В этом смысле оба эти типа KBM можно считать вспышечно-ассоциированными. При этом и KBM типа 1, и KBM типа 2 связаны с эрупцией магнитного жгута. Разница в том, что в случае KBM типа 2 (ЭП-KBM) в ядре жгута содержится холодная ($T < 6000-10000 \text{ K}$) плазма, тогда как в KBM типа 1 такой популяции плазмы не наблюдается. В дальнейшем представляется интересным понять, какие механизмы определяют появление холодной плазмы в магнитном жгуте и почему это сказывается на характере формирования фронтальной структуры KBM.

В завершение добавим, что в этой работе были рассмотрены только два KBM типа 2 (исследованные нами ранее), формирование которых наблюдалось в ЭУФ-излучении с помощью SDO/AIA на низких высотах в короне ($R_b < 1.22R_\odot$). В дальнейшем следовало бы проанализировать большее количество KBM типа 2. В частности, дополнить полученные результаты исследованием динамики KBM типа 2, связанных с протуберанцами, эрупция которых начинается с больших высот в короне ($R_b > 1.22R_\odot$).

Мы благодарим коллектив космического эксперимента SDO/AIA (NASA) за данные наблюдений, использованные в этой работе. Мы признательны также команде разработчиков каталога KBM SOHO/LASCO: "This CME catalog is generated and maintained at the CDAW Data Center by NASA and

The Catholic University of America in cooperation with the Naval Research Laboratory. SOHO is a project of international cooperation between ESA and NASA.” Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (В.Г. Еселевич, М.В. Еселевич) и за счет субсидии в рамках гос. задания по теме «ПЛАЗМА» (И.В. Зимовец).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Еселевич В.Г., Еселевич М.В. Физические отличия в начальной фазе формирования двух типов корональных выбросов массы. *Астрон. журн.* 2014. Т. 91, № 4. С. 320–331. DOI: [10.7868/S0004629914030037](https://doi.org/10.7868/S0004629914030037).

Еселевич В.Г., Еселевич М.В. Особенности начальной стадии формирования быстрого коронального выброса массы 25 февраля 2014 г. *Солнечно-земная физика.* 2020. Т. 6, № 3. С. 3–17. DOI: [10.12737/szf-63202001](https://doi.org/10.12737/szf-63202001).

Еселевич В.Г., Еселевич М.В., Романов В.А. и др. Физический механизм генерации корональных выбросов массы из верхних слоев конвективной зоны. *Изв. Крымской астрофиз. общ.* 2013. Т. 109, № 4. С. 54–60.

Еселевич В.Г., Еселевич М.В., Зимовец И.В., Руденко Г.В. Исследование начальной стадии формирования импульсного коронального выброса массы. *Астрон. журн.* 2016. Т. 93, № 11. С. 990–1002. DOI: [10.7868/S0004629916100029](https://doi.org/10.7868/S0004629916100029).

Романов В.А., Романов Д.В., Романов К.В. Сброс магнитных полей из зоны действия солнечного динамо в атмосферу Солнца. *Астрон. журн.* 1993а. Т. 70. С. 1237–1246.

Романов В.А., Романов Д.В., Романов К.В. Сброс магнитных полей из зоны действия солнечного динамо в релаксационную зону. *Астрон. журн.* 1993б. Т. 70. С. 1247–1256.

Alekseenko S.V., Dudnikova G.I., Romanov V.A., et al. Magnetic field instabilities in the Solar convective zone. *Russian J. Engineering Thermophysics.* 2000. Vol. 10. P. 243–262.

Amari T., Luciani J.F., Mikic Z., Linker J. A twist flux rope model for coronal mass ejections and two-ribbon flare. *Astrophys. J.* 2000. Vol. 529. P. L49–L52. DOI: [10.1086/312444](https://doi.org/10.1086/312444).

Antiochos S.K., DeVore C.R., Klimchuk J.A. A model for solar coronal mass ejections. *Astrophys. J.* 1999. Vol. 510. P. 485–493. DOI: [10.1086/306563](https://doi.org/10.1086/306563).

Archontis V., Hood A.W. A flux emergence model for solar eruptions. *Astrophys. J.* 2008. Vol. 674. P. L113–L116. DOI: [10.1086/529377](https://doi.org/10.1086/529377).

Bemporad A., Raymond J., Poletto G., Romoli M. A comprehensive study of the initiation and early evolution of a coronal mass ejection from ultraviolet and white-light data. *Astrophys. J.* 2007. Vol. 655. P. 576–590. DOI: [10.1086/509569](https://doi.org/10.1086/509569).

Chen H., Zhang J., Cheng X., Ma S., et al. Direct observations of tether-cutting reconnection during a major solar event from 2014 February 24 to 25. *Astrophys. J. Lett.* 2014. Vol. 797, article id. L15. DOI: [10.1088/2041-8205/797/2/L15](https://doi.org/10.1088/2041-8205/797/2/L15).

Eselevich V.G., Eselevich M.V. On the formation mechanism of the sporadic solar wind. *Geomagnetism and Aeronomy.* 2011. Vol. 51, no. 8. P. 1083–1094.

Gibson S.E., Foster D., Burkepile J., et al. The calm before the storm: the link between quiescent cavities and coronal mass ejections. *Astrophys. J.* 2006. Vol. 641. P. 590–605. DOI: [10.1086/500446](https://doi.org/10.1086/500446).

Hundhausen A.J. Coronal mass ejections: A summary of SMM observations from 1980 and 1984–1989. *The Many Faces of the Sun: A Summary of the Results from NASA's Solar Maximum Mission.* New York, Springer, 1999. P. 143–200.

Kliem B., Titov V.S., Török T. Formation of current sheets and sigmoidal structure by the kink instability of a magnetic loop. *Astron. Astrophys.* 2004. Vol. 413. P. L23–L26. DOI: [10.1051/0004-6361:20031690](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20031690).

Kliem B., Török T. Torus Instability. *Phys. Rev. Lett.* 2006. Vol. 96, iss. 25, id. 255002. DOI: [10.1103/PhysRevLett.96.255002](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.96.255002).

Krall J., Chen J., Santoro R. Drive mechanisms of erupting solar magnetic flux ropes. *Astrophys. J.* 2000. Vol. 539. P. 964–982. DOI: [10.1086/309256](https://doi.org/10.1086/309256).

Lemen J.R., Title A.M., Akin D.J., et al. The Atmospheric Imaging Assembly (AIA) on the Solar Dynamics Observatory (SDO). *Solar Phys.* 2012. Vol. 275, iss. 1–2. P. 17–40. DOI: [10.1007/s11207-011-9776-8](https://doi.org/10.1007/s11207-011-9776-8).

MacQueen R.N., Fisher R.R. The kinematic of solar inner coronal transient. *Solar Phys.* 1983. Vol. 89. P. 89–102. DOI: [10.1007/BF00211955](https://doi.org/10.1007/BF00211955).

Magara T., Longcope D.W. Sigmoid structure of an emerging flux tube. *Astrophys. J.* 2001. Vol. 559, iss. 1. P. L55–L59. DOI: [10.1086/323635](https://doi.org/10.1086/323635).

Moore R.L., Sterling A.C., Hudson H.S., Lemen J.R. Onset of the magnetic explosion in solar flares and coronal mass ejections. *Astrophys. J.* 2001. Vol. 552. P. 833–848. DOI: [10.1086/320559](https://doi.org/10.1086/320559).

Moreno-Insertis F., Schussler M., Ferriz-Mas A. Storage of magnetic flux tubes in a convective overshoot. *Astron. Astrophys.* 1992. Vol. 264. P. 686–700.

Patsourakos S., Vourlidas A., Stenborg G. Direct evidence for a fast coronal mass ejection driven by the prior formation and subsequent destabilization of a magnetic flux rope. *Astrophys. J.* 2013. Vol. 764, article id. 125. DOI: [10.1088/0004-637X/764/2/125](https://doi.org/10.1088/0004-637X/764/2/125).

Schmieder B., Démoulin P., Aulanier G. Solar filament eruptions and their physical role in triggering coronal mass ejections. *Adv. Space Res.* 2013. Vol. 51. P. 1967–1980. DOI: [10.1016/j.asr.2012.12.026](https://doi.org/10.1016/j.asr.2012.12.026).

Sharykin I.N., Zimovets I.V., Myshyakov I.I. Flare Energy Release at the Magnetic Field Polarity Inversion Line during the M1.2 Solar Flare of 2015 March 15. II. Investigation of Photospheric Electric Current and Magnetic Field Variations Using HMI 135 s Vector Magnetograms. *Astrophys. J.* 2020. Vol. 893, iss. 2, 159. DOI: [10.3847/1538-4357/ab84ef](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab84ef).

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. Vol. 104, no. A11. P. 24739–24768. DOI: [10.1029/1999JA900308](https://doi.org/10.1029/1999JA900308).

Shen Y., Liu Y., Su J. Sympathetic partial and full filament eruptions observed in one solar breakout event. *Astrophys. J.* 2012. Vol. 750, article id. 12. DOI: [10.1088/0004-637X/750/1/12](https://doi.org/10.1088/0004-637X/750/1/12).

Sterling A.C., Moore R.L. Slow-Rise and Fast-Rise Phases of an Erupting Solar Filament, and Flare Emission Onset. *Astrophys. J.* 2005. Vol. 630. P. 1148–1159. DOI: [10.1086/432044](https://doi.org/10.1086/432044).

Thernisien A., Vourlidas A., Howard R.A. Forward modeling of Coronal Mass Ejection using STEREO/SECCHI data. *Solar Phys.* 2009. Vol. 256. P. 111–130. DOI: [10.1007/s11207-009-9346-5](https://doi.org/10.1007/s11207-009-9346-5).

Vršnak B., Sudar D., Ruzdjak D. The CME-flare relationship: Are there really two types of CME? *Astron. Astrophys.* 2005. Vol. 435. P. 1149–1109. DOI: [10.1051/0004-6361:20042166](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20042166).

Zhang J., Wang J., Deng Y., Wu D. Magnetic flux cancellation associated with the major solar event on 2000 July 14. *Astrophys. J.* 2001. Vol. 548. P. L99–L102. DOI: [10.1086/318934](https://doi.org/10.1086/318934).

Zhang J., Dere K.P. A statistical study of main and residual accelerations of Coronal Mass Ejections. *Astrophys. J.* 2006. Vol. 649. P. 1100–1109. DOI: [10.1086/506903](https://doi.org/10.1086/506903).

URL: http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list (дата обращения 15 декабря 2021 г.).

Как цитировать эту статью:

Еселевич В.Г., Еселевич М.В., Зимовец И.В. О возможном различии в формировании корональных выбросов массы двух типов. *Солнечно-земная физика.* 2022. Т. 8, № 2. С. 12–22. DOI: [10.12737/szf-82202202](https://doi.org/10.12737/szf-82202202).