

УДК 523.98

## Природа возникновения корональных выбросов массы: современное состояние исследований и последние результаты

*В.Г. Еселевич*

Институт солнечно-земной физики, Иркутск-33, а/я 291, Россия, 664033  
*esel@iszf.irk.ru*

Поступила в редакцию 19 октября 2015 г.

**Аннотация.** Краткий обзор современного состояния исследований позволяет сделать вывод о том, что в формировании корональных выбросов массы (английская аббревиатура СМЕ) центральную роль играют магнитные трубки (магнитные жгуты). Однако до сих пор остается до конца не ясным вопрос о разделении всех СМЕ на два типа – “импульсные” и “постепенные”. Это означало бы существование как минимум двух различных механизмов возникновения СМЕ. Наличие “постепенных” СМЕ установлено достаточно надежно. “Импульсные” СМЕ отличаются от “постепенных” СМЕ начальной фазой своего формирования. Предполагается, что основную роль в их формировании играет всплывающая из конвективной зоны с большой скоростью магнитная трубка (магнитный жгут), заполненная относительно холодной плазмой. Такая возможность была предсказана теоретически.

При наблюдении в УФ-каналах (193 Å, 211 Å) магнитная трубка с холодной плазмой пониженной плотности должна выглядеть как движущаяся от поверхности Солнца область пониженной яркости, т. е. как полость. В случаях же большей плотности, чем окружающая плазма, выброшенная холодная плазма может иметь повышенную яркость в линии H $\alpha$  и канале 1700 Å, аналогично активному протуберанцу. Рассмотрены примеры формирования импульсных СМЕ в этих двух случаях.

NATURE OF CORONAL MASS EJECTION FORMATION: CURRENT STATE OF RESEARCHES AND RECENT RESULTS, *by V.G. Eselevich*. A brief review of the current state of researches allows us to conclude that magnetic flux tubes (magnetic flux ropes) play a central role in coronal mass ejection formation (CME). However, a question is still unanswered as to whether all CMEs can be divided into two types, namely, impulsive and gradual ones. It would mean existence of at least two different mechanisms of CME formation. The presence of gradual CMEs is established reliably enough. Impulsive CMEs are distinguished from gradual ones by initial phase of their formation. It is suggested that a magnetic tube (magnetic flux rope) that emerges from the convection zone with great velocity and is filled with relatively cold plasma plays a key role in CME formation. Such a probability was theoretically predicted.

In UV channels (193 Å, 211 Å), the magnetic tube with cold low-density plasma must look as a low-brightness region moving from the solar surface, i.e., as a cavity. When density is higher than that of ambient plasma, the ejected cold plasma can have high brightness in the H $\alpha$  line and 1700 Å channel, similarly to an active prominence. We consider examples of impulsive CME formation in these two cases.

**Ключевые слова:** плазма, корональный выброс массы, магнитная трубка, яркость, конвективная зона

---

Природа возникновения корональных выбросов массы...

## 1 Введение

Механизм возникновения корональных выбросов массы (английская аббревиатура СМЕ), исследования которых продолжаются уже около полувека, до сих пор остается далеким от понимания. Тем не менее, экспериментальными исследованиями и методами моделирования удалось достаточно надежно установить, что типичный СМЕ представляет собой магнитную трубку (магнитный жгут), заполненную плазмой, два основания которой укоренены на фотосфере (Кролл и др., 2000; Тернисен и др., 2009). Отсюда следует, что магнитные трубки (магнитные жгуты) играют центральную роль в формировании СМЕ. Однако до сих пор, с экспериментальной точки зрения, остается неясным решение основной задачи, которая является принципиальной для понимания механизма формирования СМЕ, а именно: магнитная трубка существует и располагается в короне до начала эрупции или же она также может быть выброшена из конвективной зоны? От ответа на этот вопрос зависит возможность разделения наблюдаемых СМЕ на “постепенные” и “импульсные”, а значит, вероятность существования как минимум двух различных механизмов возникновения СМЕ. Именно этот вопрос в настоящее время вызывает наиболее резкие противоречия у специалистов. Дадим краткую характеристику ситуации на данный момент.

К настоящему времени, начиная с работы (Маккуин и Фишер, 1983) существует разделение СМЕ на два типа, которые, предположительно, имеют различную природу своего происхождения: “постепенные” и “импульсные”.

“Постепенные” СМЕ характеризуются следующими особенностями (Еселевич, Еселевич, 2011):

1. Центр этих СМЕ в момент возникновения располагается в короне на высоте  $0.1 R_0 < h \leq 0.7 R_0$  относительно лимба Солнца.
2. Движение начинается из состояния покоя, т. е. начальная скорость  $v_0 \approx 0$ .
3. Начальный угловой размер в состоянии покоя  $d_0 \approx 10^\circ - 65^\circ$ . Максимальные значения скорости  $v$  на фазе распространения составляют от  $\approx 300$  км/с до  $\approx 1500$  км/с.

“Импульсные” СМЕ:

1. Их формирование происходит близко к поверхности Солнца на высотах  $h < 0.1 R_0$ .
2. Их скорость уже в первый момент регистрации у поверхности Солнца может достигать  $\approx 100$  км/с и более.
3. Их начальный угловой размер  $\sim 1^\circ$ .

Максимальные значения скорости  $v$  на фазе распространения в среднем больше, чем для “постепенных” и могут достигать 2500–3000 км/с.

Если существование и перечисленные свойства “постепенных” СМЕ установлены достаточно надежно, то свойства и существование “импульсных” до сих пор остаются под большим вопросом, т. к. на высотах  $h < 0.1 R_0$ , где происходит их формирование, достаточно сложно проводить надежные исследования, и поэтому нужны особые подходы.

## 2 “Постепенные” СМЕ

Начнем рассмотрение с конкретного примера “постепенного” СМЕ, возникновение которого происходит на предельно малой высоте  $h < 0.2 R_0$ .

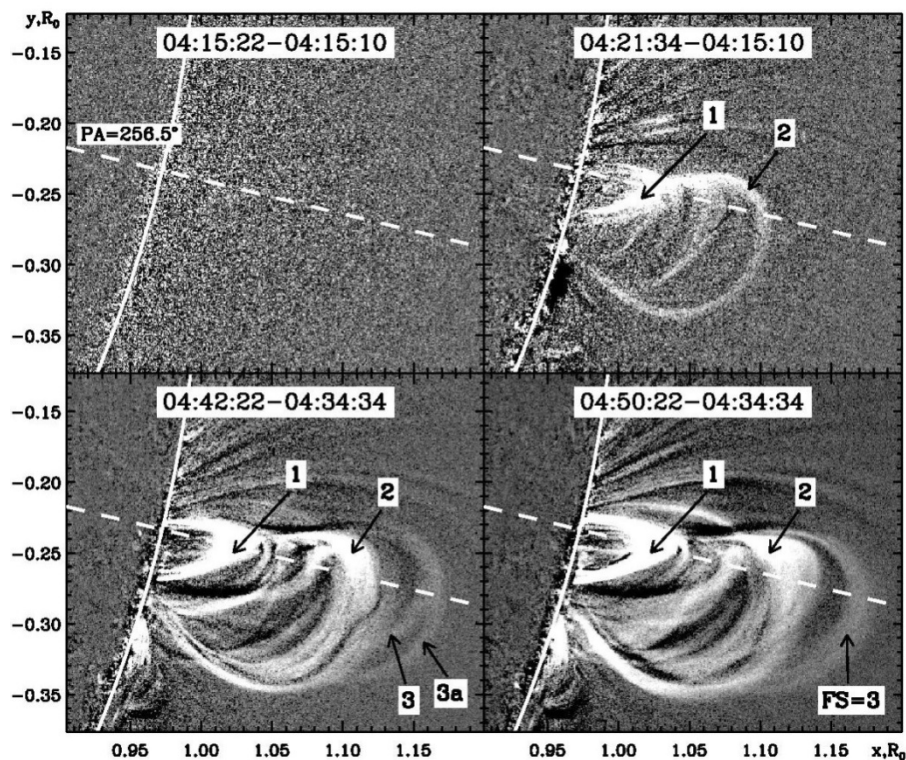
На рис. 1 представлены изображения разностной яркости канала  $131 \text{ \AA}$  для “постепенного” СМЕ (19.07.2012) в последовательные моменты времени. Видно, что на начальной стадии формирования поперечное сечение СМЕ представляет собой вложенные друг в друга арочные структуры 1, 2, 3. Это типичное поперечное сечение магнитного жгута. Перед эрупцией (в течение десятков минут) толщина и яркость структур увеличивается, но при этом они остаются

неподвижными. Эрупция начинается с движения внешней структуры 3 и 3а, которая затем становится основой будущей фронтальной структуры (FS). Внутренние структуры 1 и 2 лишь испытывают некоторые колебания вблизи положения равновесия. Их заметное движение начинается спустя десяток минут после начала движения FS. Это более наглядно видно из их кинематических кривых, которые приведены и анализируются ниже на рис. 6а.

На больших высотах  $0.1 R_0 < h < 1.0 R_0$  возникновение “постепенных” СМЕ было доказано ранее в ряде работ (Хундхаузен, 1994; Шили и др., 1999; Бемпорад и др., 2007; Еселевич, Еселевич, 2011).

В результате всех перечисленных исследований картина возникновения “постепенных” СМЕ представляется следующей.

В короне существует магнитная трубка (жгут), заполненная плазмой, два основания которой укоренены на фотосфере. В результате развития неустойчивости трубка может эруптировать. Тип неустойчивости и причины ее развития, несмотря на ряд рассмотренных механизмов, остаются до конца не ясными.



**Рис. 1.** Изображения разностной яркости в EUV “постепенного” СМЕ в последовательные моменты времени для СМЕ, 19 июля 2012 г. Данные AIA/SDO, канал 131 Å. Из статьи (Еселевич, Еселевич, 2015)

### 3 “Импульсные” СМЕ

Возможной альтернативой “постепенных” СМЕ являются “импульсные” СМЕ. Их формирование может быть связано с выбросом из конвективной зоны с большой (сверхзвуковой) скоростью магнитной трубки (магнитного жгута), существование которой предсказано теоретически (Романов и др., 1993).

Экспериментальное доказательство существования “импульсных” СМЕ является непростой задачей. Для этого необходимы измерения магнитного поля Солнца с временным разрешением порядка 1–10 секунд. На данном этапе исследований это невозможно сделать современными магнитографами (например, SOHO/MDI имеет разрешение порядка 1 мин). Тем не менее, быст-

Природа возникновения корональных выбросов массы...

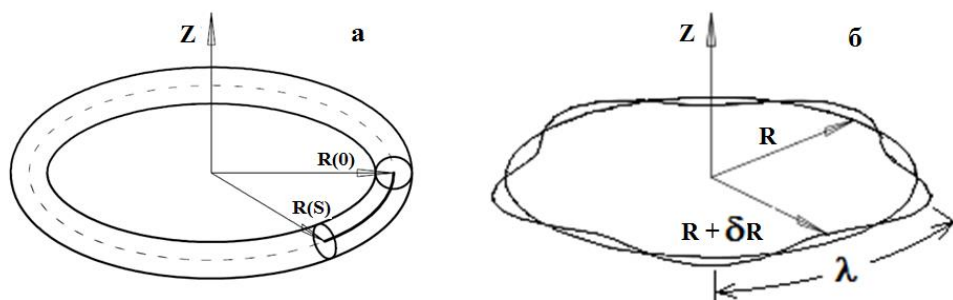
рый подъем магнитной трубки до уровня фотосферы со скоростью до  $\approx 12$  км/с и более, превышающей почти в два раза локальную скорость звука, был зарегистрирован в ряде экспериментов: на инструментах SUNRISE/IMaX (Борреро и др., 2010), Hinode/SOT (Мартинез-Пиллет и др., 2011), (SST)/CRISP (Джафарзаде и др., 2015).

Однако обнаружить всплывающую магнитную трубку можно и другими способами. Например, опираясь на ряд экспериментальных особенностей проявления этого процесса, которые предсказываются теорией тонкой магнитной трубки. Тому, что удалось сделать в этой области за последние годы в теории и эксперименте, посвящена следующая часть статьи.

### 3.1 Механизм возникновения “импульсных” CME в рамках теории тонкой магнитной трубки

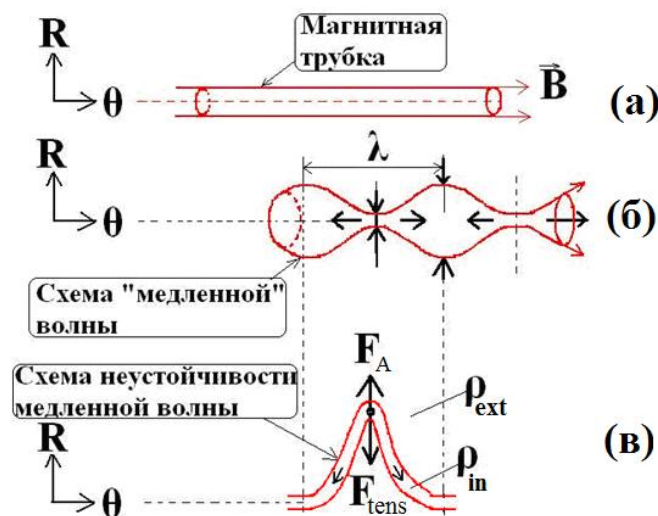
Для понимания природы “импульсных” CME будем опираться на выводы теории, всплывающей из конвективной зоны тонкой магнитной трубки, развитой в работах (Романов и др., 1993; Фан, 2009). Суть их подхода и результатов в следующем:

1. Трубка находится в равновесии и замкнута в кольцо с радиусом ( $d$  – диаметр трубки) и центром в центре Солнца, рис. 2а.
2. Вдоль трубки задается возмущение малой амплитуды с волновым числом  $m$  (длина волны  $\lambda$ ), рис. 2б.
3. Исследуется устойчивость медленной моды колебаний или устойчивость “медленной” волны, схема которой показана на рис. 3.



**Рис. 2.** Форма тонкой магнитной трубки в плоскости экватора Солнца: а) – не возмущенная, б) – возмущенная колебаниями с длиной волны (волновое число “ $m$ ”)

Из рис. 3б видно, что “медленная” волна характеризуется тем, что в ней вещество смещается в основном вдоль трубки (горизонтальные стрелки). Это значит, что давление изменяется в противофазе к напряженности “ $B$ ” магнитного поля. В результате на участках с повышенным магнитным полем уменьшается плотность  $\rho_{in}$  внутри трубки, т. к. вещество стекает в соседние участки. Возрастает подъемная сила Архимеда  $F_A \approx (\rho_{in} - \rho_{ext}) \cdot g$ , где:  $\rho_{in}$  и  $\rho_{ext}$  – плотность плазмы соответственно внутри и вне трубки,  $g$  – ускорение силы тяжести на Солнце. Когда она становится больше противоположно направленной ей силы натяжения магнитного поля  $F_{tens} \approx B \cdot \delta B / 4\pi\lambda$ , данный участок начинает быстро подниматься вверх к фотосфере, рис. 3в. Это сценарий развития неустойчивости “медленной” волны или неустойчивости Паркера.



**Рис. 3.** Схема развития неустойчивости “медленной” волны (неустойчивости Паркера) в случае тонкой магнитной трубки, расположенной в плоскости солнечного экватора (координаты  $R$ ,  $\theta$ )

Определяющим параметром в развитии этой неустойчивости является длина волны (или волновое число  $m$ ) (Романов и др., 2015):

1. В диапазоне  $0 < m < 4$  неустойчивость Паркера начинается в нижних слоях конвективной зоны. При подъеме к фотосфере через большой перепад внешнего давления газа трубка расширяется, а значения напряженности ее магнитного поля уменьшаются до значений  $\sim (0.1-10)$  Гс. Так зарождаются и стабильно поддерживаются фоновые магнитные поля на фотосферном уровне Солнца.
2. В диапазоне  $10 < m < 20$  начало неустойчивости перемещается в середину конвективной зоны. На фотосферный уровень с небольшими скоростями выносятся магнитные поля уже с более высокими значениями напряженности ( $10^2-10^3$ ) Гс. Так зарождаются активные области и появляются солнечные пятна на фотосферном уровне.
3. При  $m > 20$  скорости подъема магнитного поля значительно превышают местную скорость звука. Такие трубки могут стать источником “импульсных” СМЕ.

В работе (Романов и др., 2015) был приведен пример расчета развития нелинейной фазы неустойчивости Паркера для гармоники с волновым числом  $m = 28$ . В работе показано, что в результате развития неустойчивости Паркера можно ожидать появление на уровне фотосферы плотного сгустка замагниченной плазмы (более холодной, чем фотосферная плазма), летящего с большой скоростью. В зависимости от параметров плазмы, такой сгусток в свете различных УФ-каналов может быть виден как движущаяся со скоростью в несколько десятков км/с и более: 1) область пониженной яркости (или полость), либо как 2) область повышенной яркости. И все это в зависимости от конкретных условий наблюдений и длины волны канала регистрируемого излучения.

### 3.2 Регистрация “импульсных” СМЕ в различных условиях эксперимента

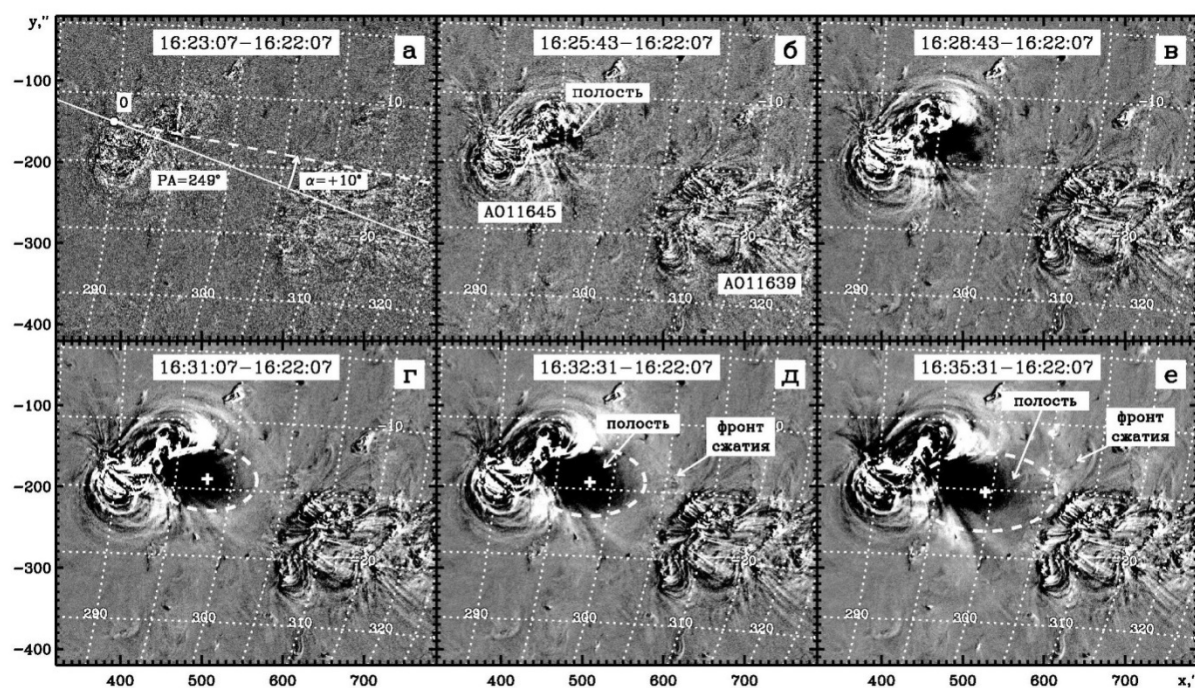
**1. Рассмотрим случай “импульсного” СМЕ 5 января 2013 г.**, который наблюдается как результат развития полости. Его отличительной особенностью является отсутствие эрупции каких-либо ярких структур. Событие сопровождается лишь слабой вспышкой рентгеновского балла  $< C1.4$ . Все это позволяет однозначно отождествить наблюдаемую полость с движущейся

Природа возникновения корональных выбросов массы...

замагниченной плазмой, имеющей пониженную температуру. И однозначно исключить появление потемнения (dimmings) как следствие эрупции ярких структур.

На рис. 4 представлены изображения разностной яркости в канале  $193 \text{ \AA}$ , SDO/AIA, на диске Солнца в последовательные моменты времени для СМЕ 5 января 2013. Точками показаны кэррингтоновские долготы и широты. Начиная с  $t \approx 16:25:43$  в активной области АО 11645 появляется и увеличивается в размерах полость, западная граница которой в направлении, показанном на рис. 4а пунктирной линией, движется со скоростью  $v_{\phi} \approx 50 \text{ км/с}$ . Белым пунктирным эллипсом показана граница полости. При  $t \approx 16:31:07$  впереди западной границы полости формируется фронт сжатия, который затем становится основой фронтальной структуры СМЕ. Движение полости происходит между двумя активными областями: АО 11645 и АО 11639.

Очевидно, что рассмотренная картина образования и движения полости на диске Солнца является лишь проекцией общего движения полости, происходящего преимущественно в радиальном направлении. Для анализа радиального движения рассмотрим это событие, используя данные EUVI, полученные на STEREO-A (EUVI/STEREO-A).

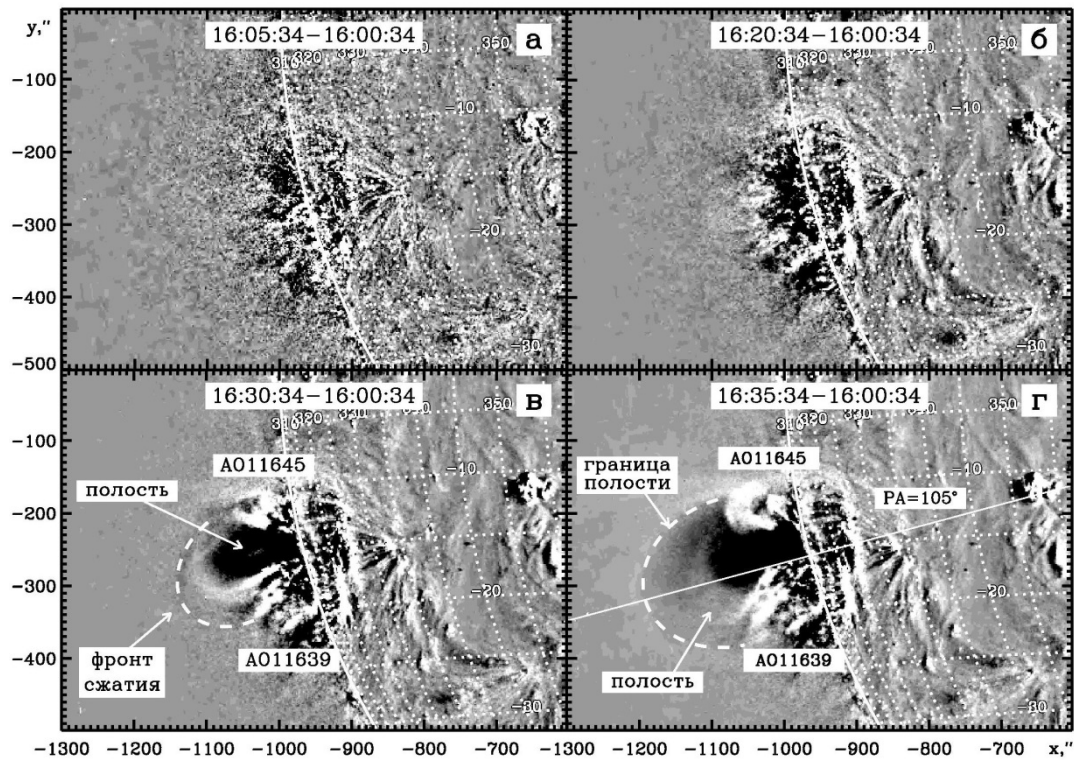


**Рис. 4.** Разностные EUV-изображения в последовательные моменты времени, показывающие развитие “импульсного” СМЕ на диске Солнца. Данные AIA/SDO,  $193 \text{ \AA}$ ; 5 января 2013 г. (рис. 3 из статьи Еселевич, Еселевич, 2015)

На рис. 5 представлены разностные изображения EUVI/STEREO-A в линии  $195 \text{ \AA}$  в последовательные моменты времени, начиная с момента  $16:05:34$  для СМЕ 5 января 2013 г.

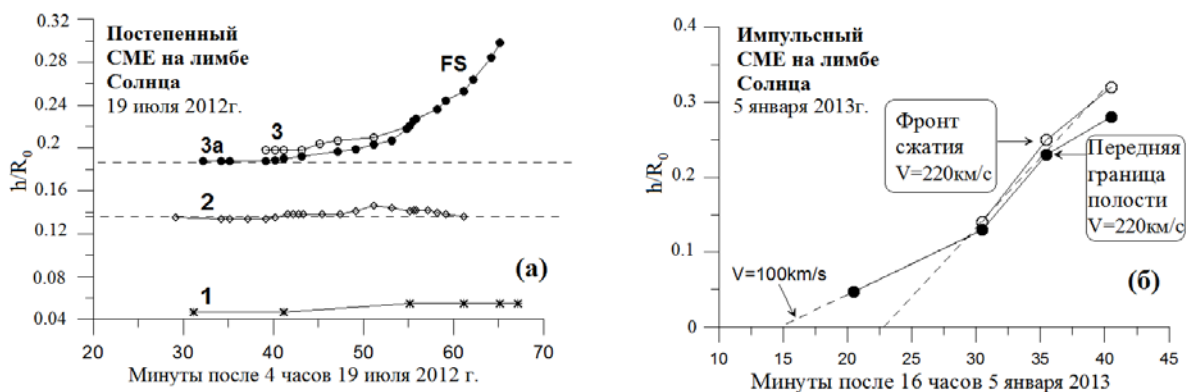
В отличие от изображений SDO, эти данные имеют минимальный интервал между изображениями около 5 минут. Направление движения СМЕ показано белой прямой линией ( $PA = 105^\circ$ , рис. 5г).

В направлении  $PA = 105^\circ$  в течение  $\approx 15$  минут до начала события на рис. 5 (а, б) отсутствуют какие-либо заметные изменения яркости наблюдаемых структур. В момент  $16:30:34$  между двумя АО 11645 и 11639, которые видны в проекции на плоскость лимба, вблизи поверхности Солнца появляется быстро движущаяся полость, окруженная слабым “ореолом”, рис. 5в. Через следующие 5 минут “ореол” становится четко выраженным фронтом сжатия (рис. 5г). Пунктирной дугой на рис. 5 (в, г) показано положение границы полости.



**Рис. 5.** Разностные EUV-изображения в последовательные моменты времени, показывающие развитие “импульсного” CME 5 января 2013 г. на Е-лимбе Солнца. Данные EUVI/STEREO-A, 195 Å. (рис. 6 из статьи Еселевич, Еселевич, 2015)

Принципиальное отличие развития начальной фазы “постепенных” и “импульсных” CME отчетливо видно на их кинематических кривых, рис. 6 (а) и (б), построенных на лимбе Солнца, соответственно для рассмотренного выше “постепенного” CME 19.07.2012 в направлении  $PA = 256.5$  и “импульсного” CME 5.01.2013 в направлении  $PA = 105$ .



**Рис. 6.** Зависимость от времени высоты  $h/R_0$  на лимбе Солнца.

а) Для структуры 1 (звездочки), структуры 2 (ромбики), структуры 3 (черные кружки) и структуры 3а (светлые кружки). В направлении  $PA = 256.5$ . “Постепенный” CME на лимбе. 19 июля 2012 г. По данным AIA/SDO, 131 Å.

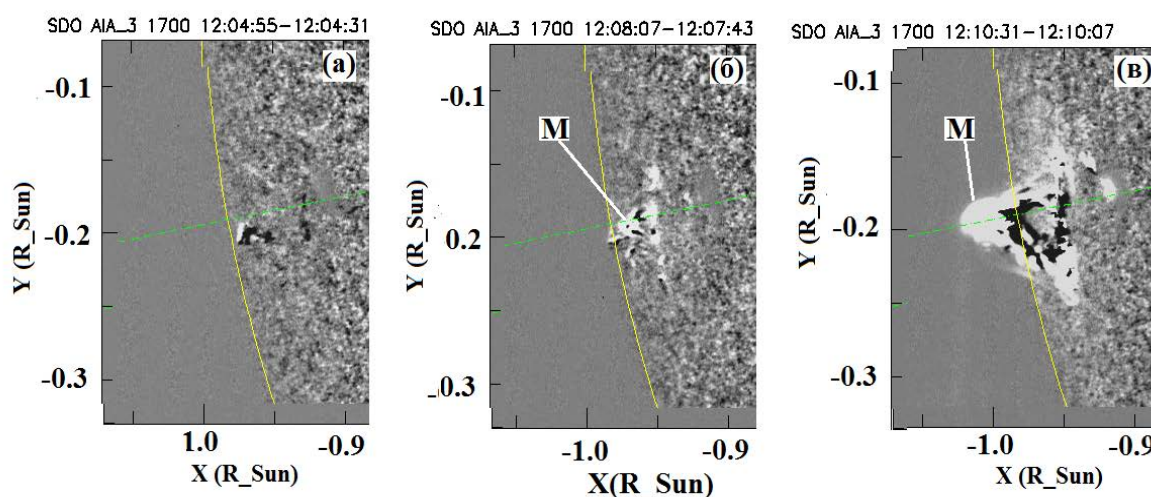
б) Передней границы полости (черные кружки) и фронта сжатия (светлые кружки) в направлении  $PA = 105$ . “Импульсный” CME. 5 января 2013 г. По данным EUVI/STEREO-A, 195 Å

Природа возникновения корональных выбросов массы...

Из него видно, что процесс формирования “постепенных” СМЕ начинается с движения внешней оболочки, расположенной в короне магнитной трубки (жгута). Она представляет собой сдвоенную структуру 3 (черные кружки) и 3а (светлые кружки), которая является основой будущей фронтальной структуры FS. При этом внутренние структуры 1 (звездочки) и 2 (ромбики) лишь испытывают некоторые колебания вблизи положения равновесия, рис. 6а. Их заметное движение начинается спустя десяток минут после начала движения FS. В то же время “импульсный” СМЕ начинается как выброс от фотосферы полости или магнитной трубки с холодной плазмой (черные кружки на рис. 6б), впереди которой формируется фронт сжатия (светлые кружки). Полость и фронт сжатия затем становятся основой СМЕ.

**2. Рассмотрим случай “импульсного СМЕ” 24 августа 2014 г.** как результат развития не полости, а области повышенной яркости “холодного” канала  $1700 \text{ \AA}$  ( $T \approx 5 \cdot 10^3 \text{ K}$ ) (Верназа и др., 1973) и линии  $H_{\alpha}$  ( $6562.8 \text{ \AA}$ ), отражающей температуру плазмы  $T(H_{\alpha}) \approx (5-8) \cdot 10^3 \text{ K}$  (Прист, 1985).

Отличительной особенностью этого СМЕ была локализация его места возникновения вблизи лимба, но на видимой части диска. Это позволило достаточно надежно исследовать начальную стадию процесса. Она представлена на рис. 7 в виде изображений бегущей разностной яркости для трех последовательных моментов времени в канале  $1700 \text{ \AA}$ .



**Рис. 7.** Изображения бегущей разностной яркости в канале  $1700 \text{ \AA}$  развития “импульсного” СМЕ в последовательные моменты времени по данным AIA/SDO, 24 августа 2014 г.

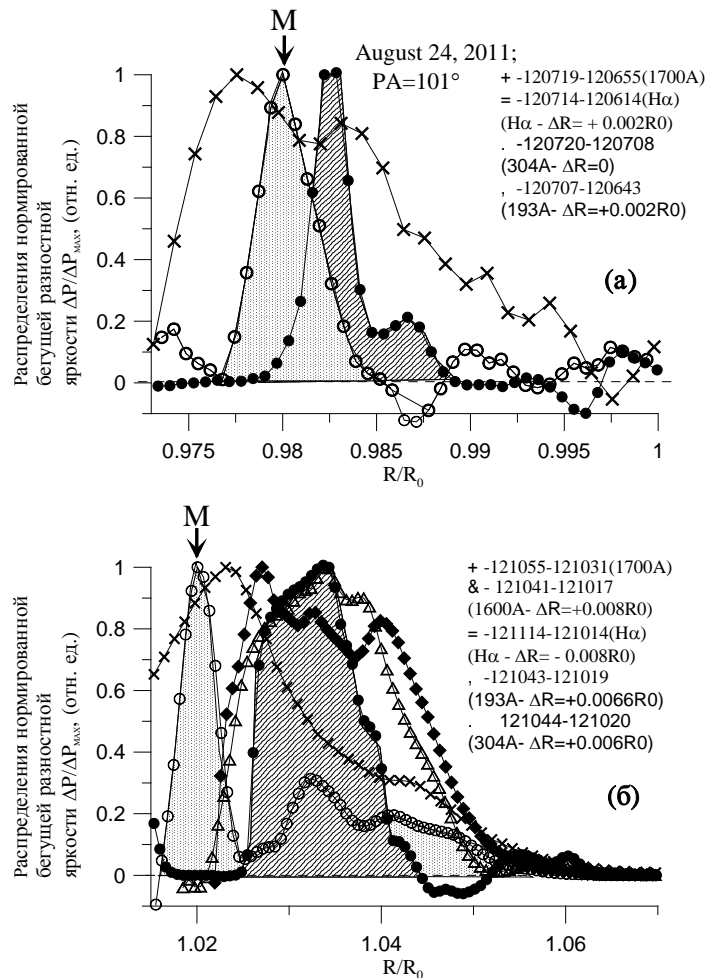
Из него видно, что в направлении  $PA \approx 101^\circ$ , указанном пунктиром, перед началом события в месте его появления в момент  $t_0 \approx 12:04:55 \text{ UT}$  яркостные возмущения отсутствовали (рис. 7а). После  $t_0$  вблизи лимба появляется яркий участок (в свете канала  $1700 \text{ \AA}$ ), обозначенный “М”, левая граница которого движется от Солнца, рис. 7 (б, в). В результате движения и расширения этот яркий участок становится арочной структурой (оболочкой). Аналогичная картина наблюдается и в линии  $H_{\alpha}$ , которая здесь не приводится. Такая арочная структура есть классическое проявление поперечного сечения магнитной трубки (жгута) с плазмой с достаточно низкой температурой, которую обычно называют активным протуберанцем или “Jet” (при наблюдении в линии  $H_{\alpha}$ ).

Более детальный анализ распределений бегущей разностной яркости  $\Delta P(R)$ , построенных в направлении  $PA \approx 101^\circ$  (пунктир на рис. 7), показал, что первое появление максимума “М” регистрируется в момент  $t \approx 12:05:53 \text{ UT}$  на расстоянии  $R \approx 0.975 R_0$ . Здесь оно уже имеет радиальную скорость движения  $v \approx 60-70 \text{ км/с}$ . При этом до появления максимума “М” в течение нескольких часов на диске Солнца отсутствовал как минимум пониженной яркости в линии  $H_{\alpha}$ , которому соответствует волокно, так и максимум яркости  $H_{\alpha}$  вне диска на расстоянии



$R > 1.02 R_0$ , который связан с протуберанцем. Отсутствие протуберанца на лимбе на  $R > 1.02 R_0$  фиксировалось в течение всего 23 августа 2014 г., когда долгота 78 E расположения максимума “М” яркости за счет вращения Солнца проходила Е лимб в момент  $t \approx 12:00$  UT или была непосредственно за ним,  $t \approx 00:59$  UT.

Все изложенное позволяет сделать предварительный вывод о том, что появление движущегося максимума разностной яркости “М” связано с выбросом из конвективной зоны магнитной трубки с плазмой с достаточно низкой температурой.



**Рис. 8.** Пространственные распределения бегущей разностной яркости, нормированной на  $\Delta P_{\max}$ , в направлении PA = 101 для нескольких различных каналов УФ и линии H $\alpha$ , приведенные к двум различным моментам времени регистрации канала 1700 Å: а)  $t = 12:07:19 - 12:06:59$  UT; б)  $t = 12:10:55 - 12:10:13$  UT. Обозначения: черные кружки – 193 Å, треугольники – 304 Å, светлые кружки – H $\alpha$ , черные ромбики – 1600 Å, крестики – 1700 Å. Данные AIA/SDO и NISP (<http://gong2.nso.edu/>), 24 августа 2014 г.

#### 4 Оценка температуры плазмы внутри магнитной трубки, выброшенной из конвективной зоны

Для оценки температуры плазмы внутри магнитной трубки “М” рассмотрим пространственные распределения бегущей разностной яркости, нормированные на  $\Delta P_{\max}$ , для нескольких различных каналов УФ и линии H $\alpha$ .

Природа возникновения корональных выбросов массы...

Выберем начальный момент времени  $t \approx 12:07:19$  UT, когда профили  $\Delta P(R)$  на всех этих каналах уже достаточно четко сформированы и распространяются со скоростью  $v \approx 60\text{--}70$  км/с в радиальном направлении. Но при этом еще остаются на диске Солнца. Последнее важно при оценке температуры, т. к. излучение фотосферы Солнца можно рассматривать как излучение абсолютно черного тела и оценивать температуру плазмы в рамках такого приближения (Верназа и др., 1973; Гибсон, 1977).

Моменты времени регистрации различных каналов несколько отличались (примерно на  $t \leq 12$  секунд). Поэтому, с учетом скорости распространения  $v \approx 65$  км/с, различие в  $t$  профилей разных каналов были скомпенсированы соответствующим смещением их в пространстве на величину  $\pm R \approx (\pm t) \cdot v$  (т. е. в положительную или отрицательную сторону) в зависимости от знака  $\pm t$ . Так, при  $t \approx 12:07:19$  UT величина  $R$ : для  $1700 \text{ \AA}$  составила  $R = 0$ , для  $H_\alpha - R = +0.002 R_0$ , для  $304 \text{ \AA} - R = 0$ , для  $193 \text{ \AA} - R = +0.002 R_0$ .

Результат приведения профилей к моменту  $t \approx 12:07:19$  UT показан на рис. 8 а.

Наиболее широкий профиль  $\Delta P$  – в линии  $H_\alpha$  (крестики) с максимумом, расположенным на  $R \approx 0.978 R_0$ . Линия  $H_\alpha$  ( $6562.8 \text{ \AA}$ ) отражает температуру плазмы  $T(H_\alpha) \approx (5\text{--}8) \cdot 10^3$  К (Верназа и др., 1973). Внутри на  $R \approx 0.98 R_0$  наблюдается максимум “М” узкого профиля канала  $1700 \text{ \AA}$  (светлые кружки, выделен фоном из точек). Он отражает температуру  $T(1700 \text{ \AA}) \approx 5 \cdot 10^3$  К (Лемен и др., 2012). Перед ним на  $R \approx 0.983 R_0$  располагается узкий пик канала  $193 \text{ \AA}$  (черные кружки, выделен наклонным штрихом), который соответствует температурам  $T(193 \text{ \AA}) \approx 1.6 \cdot 10^6$  К и  $\approx 2 \cdot 10^7$  К (Лемен и др., 2012). Эта же картина еще более четко видна в следующий момент времени с максимумом “М” канала  $1700 \text{ \AA}$ , расположенным на  $R \approx 1.02 R_0$  (рис. 8б). ( $T(304 \text{ \AA}) \approx 5 \cdot 10^4$  К;  $T(1600 \text{ \AA}) \approx 10^5$  К).

Наблюдаемая картина может иметь следующую интерпретацию. Имеет место выброс из конвективной зоны со скоростью  $v \approx 65$  км/с магнитной трубки, заполненной плазмой, с температурой  $T \approx (5\text{--}8) \cdot 10^3$  К. При этом внутренне ядро этой плазмы, возможно, более холодное и имеет  $T < 5 \cdot 10^3$  К. При движении над фотосферой в результате прогрева внешняя оболочка холодного ядра прогревается до  $T > 10^6$  К.

## 5 Выводы

1. Корональный выброс массы (СМЕ) представляет собой магнитную трубку (жгут), заполненную плазмой, два основания которой укоренены на фотосфере.
2. СМЕ разделяются на два типа: “постепенные” и “импульсные”. Механизмы их возникновения отличаются принципиально.
3. “Постепенные” СМЕ возникают в результате эрупции квазистационарной корональной магнитной трубки, два основания которой укоренены на фотосфере. Тип неустойчивости, вызывающий такую эрупцию, остается неясным.
4. Основу “импульсных” СМЕ составляет магнитная трубка (жгут), заполненная холодной плазмой, которая выбрасывается из конвективной зоны со скоростью  $\approx 60\text{--}70$  км/с. Она может быть зарегистрирована либо как а) движущаяся область пониженной яркости (или полость) при наблюдении в “горячих” УФ-каналах  $193 \text{ \AA}$ ,  $211 \text{ \AA}$ , либо как б) движущаяся область повышенной яркости при наблюдении в “холодном” канале  $1700 \text{ \AA}$  и в линии  $H_\alpha$ .
5. Причина выброса магнитной трубкой из конвективной зоны – развитие неустойчивости Паркера (медленной волны).

## Литература

- Бемпорад и др. (Bemporad A., Raymond J., Poletto G., et al.) // *Astrophys. J.* 2007. V. 655. P. 576.
- Борреро и др. (Borrero J.M., Martinez-Pillet V., Schlichenmair R., et al.) // *Astrophys. J.* 2010. V. 723. P. L144.
- Верназа и др. (Vernazza J.E., Avrett E.H., and Loeser R.) // *Astrophys. J.* 1973. V. 184. P. 605.
- Гибсон Э. // *Спокойное Солнце* / Ред. Кононовича Э.В. Москва: Мир. 1977.
- Джафарзадех и др. (Jafarzadeh S., Rouppe van der Voort L., and de la Cruz Rodríguez J.) // *Astrophys. J.* 2015. V. 810. P. 54.
- Еселевич, Еселевич (Eselevich V.G., Eselevich M.V.) // *Geomagnetism and Aeronomy.* 2011. V. 51. P. 1083 .
- Еселевич В.Г., Еселевич М.В. // *Космич. исслед.* 2015. Т. 53. С. 24.
- Кролл и др. (Krall J., Chen J., and Santoro R.) // *Astrophys. J.* 2000. V. 539. P. 964.
- Лемен и др. (Lemen J.R., Title A.M., Akin D.J., et al.) // *Solar Phys.* 2012. V. 275. P. 17.
- Маккуин, Фишер (MacQueen R.M., Fisher R.R.) // *Solar Phys.* 1983. V. 89. P. 89.
- Мартинез-Пиллет и др. (Martínez-Pillet V., del Toro Iniesta J.C., and Quintero Noda C.) // *Astron. Astrophys.* 2011. V. 530. P. A111.
- Прист Э. // *Солнечная магнитогидродинамика.* Москва: Мир. 1985.
- Романов В.А., Романов Д.В., Романов К.В. // *Астрон. журн.* 1993. Т. 70. С. 1237.
- Романов и др. (Romanov D.V., Romanov K.V., Romanov V.A., Kuchеров N.V., Eselevich V.G., Eselevich M.V.) // *Adv. Space Res.* 2015. V. 55. P. 949.
- Тернисиен и др. (Thernisien A., Vourlidas A., and Howard R.A.) // *Solar Phys.* 2009. V. 256. P. 111.
- Фан (Fan Y.) // *Living Rev. Solar Phys.* 2009. V. 6. P. 4.
- Хундхаузен (Hundhausen A.J.) // *Coronal mass ejections: A summary of SMM observations from 1980 and 1984–1989* / Ed. Strong K.T., Saba J.T. and Haisch B.M. Preprint High Altitude Observatory National Center for Atmospheric Research. Boulder. CO. Published in “The Many Faces of Sun; Scientific “Highlights of the Solar Maximum Mission”. Springer-Verlag. 1994.
- Шили и др. (Sheeley N.R.Jr., Walter H., Wang Y.-M., et al.) // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104. P. 24739.