

УДК 523.9-8

## ИССЛЕДОВАНИЕ НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ ФОРМИРОВАНИЯ “ИМПУЛЬСНОГО” КОРОНАЛЬНОГО ВЫБРОСА МАССЫ

© 2016 г. В. Еселевич<sup>1\*</sup>, М. Еселевич<sup>1</sup>, И. Зимовец<sup>2,3,4</sup>, Г. Руденко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

<sup>2</sup>Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

<sup>3</sup>National Key Laboratory of Space Weather, National Space Science Center,  
Chinese Academy of Sciences, Beijing, China

<sup>4</sup>International Space Science Institute, Beijing, China

Поступила в редакцию 10.01.2016 г.; принята в печать 29.03.2016 г.

Проведен анализ “импульсного” коронального выброса массы (КВМ) 24 августа 2014 г. по УФ изображениям в каналах 193, 304, 1600 и 1700 Å инструмента SDO/AIA и по данным наблюдений в линии H $\alpha$  (6562.8 Å) телескопов обсерваторий EI Teide и Big Bear. Показано, что формирование “импульсного” КВМ связано с появлением магнитной трубки (жгута), движущейся со скоростью  $\approx 35$  км/с и содержащей плазму более холодную, чем плазма фотосферы. При движении в короне магнитная трубка сталкивается с корональным квазистационарным магнитным жгутом, два основания которого укоренены на фотосфере, и ускоряет его (приводит в движение). В результате такого взаимодействия происходит формирование КВМ, фронтальной структурой которого является поверхность коронального магнитного жгута. На стадии формирования в окрестности оснований КВМ по данным SDO/HMI не было зарегистрировано возрастания или изменения потока магнитного поля. Это может свидетельствовать в пользу того, что магнитная трубка начала свое движение из слоев, располагающихся в окрестности температурного минимума.

DOI: 10.7868/S0004629916100029

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Механизм возникновения корональных выбросов массы (КВМ), исследования которых продолжаются уже около полувека, до сих пор остается далеким от понимания. Тем не менее, при помощи экспериментальных исследований и моделирования удалось достаточно надежно установить, что типичный КВМ представляет собой магнитный жгут (трубку), заполненный плазмой, два основания которого укоренены на фотосфере [1, 2]. Отметим, что магнитный жгут является магнитной трубкой, но при этом имеет дополнительный компонент магнитного поля, перпендикулярный основному продольному полю трубки. В теории для упрощения обычно используется понятие магнитной трубки.

Несмотря на многолетние исследования, до сих пор не ясно, каким образом происходит формирование магнитного жгута, связанного с КВМ. Ответ на этот вопрос важен, в частности, для понимания

механизмов двух различных типов КВМ — “постепенных” и “импульсных” [3].

Связь магнитных жгутов с “постепенными” КВМ доказана экспериментально. В частности, авторам работы [4] впервые удалось наблюдать и исследовать развитие на лимбе сечения магнитного жгута “постепенного” КВМ (19 июля 2012 г.), возникшего в активной области на очень малой высоте над лимбом,  $h < 0.1 R_{\odot}$ . На больших высотах,  $0.1 R_{\odot} < h < 1.0 R_{\odot}$ , их возникновение было доказано ранее в ряде работ [3, 5–7].

Картина возникновения “постепенных” КВМ выглядит следующим образом. В короне существует магнитный жгут, заполненный плазмой, два основания которого укоренены на фотосфере. В результате развития неустойчивости он может “эруптировать”. Тип неустойчивости и причины ее развития, несмотря на ряд рассмотренных механизмов [8–12], до конца не ясны.

Процесс возникновения “импульсных” КВМ менее понятен, чем “постепенных”. Неясно, существует ли магнитный жгут в солнечной атмосфере

\*E-mail: esel1@iszf.irk.ru

до начала КВМ или же он формируется непосредственно во время развития КВМ. Обсуждается также альтернативная гипотеза, при которой выброс магнитного жгута, вызывающего КВМ, происходит из-под фотосферы. Такая возможность была предсказана в рамках теории тонкой магнитной трубки как результат развития неустойчивости “медленной” волны или неустойчивости Паркера [13–15]. Основные качественные выводы теории и первое их сравнение с результатами экспериментов приведены в работах [16–18].

Экспериментальное исследование процесса формирования “импульсных” КВМ является непростой задачей. Наиболее благоприятно проводить такие исследования в тех редких случаях, когда место возникновения КВМ локализовано вблизи лимба на видимой части диска. Во многих ранее исследованных событиях локализация места появления КВМ располагалась на невидимой половине диска вблизи лимба, поэтому подобный анализ провести было невозможно [7, 19, 20].

Целью настоящей работы является изучение самой начальной стадии формирования “импульсного” КВМ вблизи лимба на видимой части солнечного диска в событии 24 августа 2014 г. на основе анализа современных наблюдательных данных.

## 2. ДАННЫЕ И МЕТОДЫ АНАЛИЗА

Для анализа использовались ультрафиолетовые (УФ) изображения в каналах 193, 304, 1600 и 1700 Å, полученные на инструменте SDO/AIA [21]. Временной интервал на SDO/AIA между изображениями составляет 12 с, пространственное разрешение (два пикселя) — 1.2 угловые секунды, что соответствует  $\approx 0.00125 R_{\odot}$ , поле зрения достигает  $\approx 1.4 R_{\odot}$ . Также использовались изображения, полученные в линии  $H\alpha$  (6562.8 Å) на телескопах EI Teide (Испания) и Big Bear (США) в рамках Integrated Synoptic Program (NISIP)<sup>1</sup> с временным разрешением  $\approx 1$  мин.

Данные яркости представлялись в виде разностной яркости  $\Delta P(t) = P(t) - P(t_0)$ , где  $P(t_0)$  — невозмущенная яркость в момент  $t_0$  до возникновения рассматриваемого события,  $P(t)$  — возмущенная яркость в моменты времени  $t > t_0$ .

По изображениям разностной яркости исследовалась динамика КВМ. Для детального анализа по разностным изображениям строились распределения (одномерные сканы) разностной яркости  $\Delta P(t, R) = P(t, R) - P(t_0, R)$  вдоль заданного позиционного угла  $PA$  (отсчитывается от северного

полюса Солнца против часовой стрелки). Положение начальной точки распределений совпадает с центром солнечного диска, а расстояние  $R$  отсчитывается в долях радиуса Солнца  $R_{\odot}$ . Для уменьшения уровня шума при построении распределений сигнал разностной яркости усреднялся в интервале угла  $\delta\alpha = 5^\circ$  относительно начальной точки. В отдельных случаях использовались УФ изображения, представленные в виде бегущей разностной яркости  $\Delta P(R) = P(t_2, R) - P(t_1, R)$ , где  $P(t_2, R)$  и  $P(t_1, R)$  — яркости ближайших по времени изображений.

Для изучения динамики магнитного поля на фотосфере в области исследуемого выброса использованы магнитограммы инструмента SDO/HMI [22] как для компонента магнитного поля, параллельного лучу зрения, с шагом по времени 45 с, так и векторные магнитограммы с шагом по времени 12 мин<sup>2</sup>. Угловое разрешение HMI составляет  $\sim 1''$  (два пикселя). Точность измерений продольного компонента поля — около 10 Гс, вектора поля — около 20 Гс. Дополнительно использовались доплерограммы для изучения динамики вещества на фотосфере. Проводился анализ как непосредственно самих карт данных, так и разностных карт с фиксированным начальным временем  $t_0$ , а также бегущих разностных карт.

## 3. АНАЛИЗ КВМ 24 АВГУСТА 2014 г.

### 3.1. Динамика возникновения КВМ в линии $H\alpha$ и в канале 1700 Å

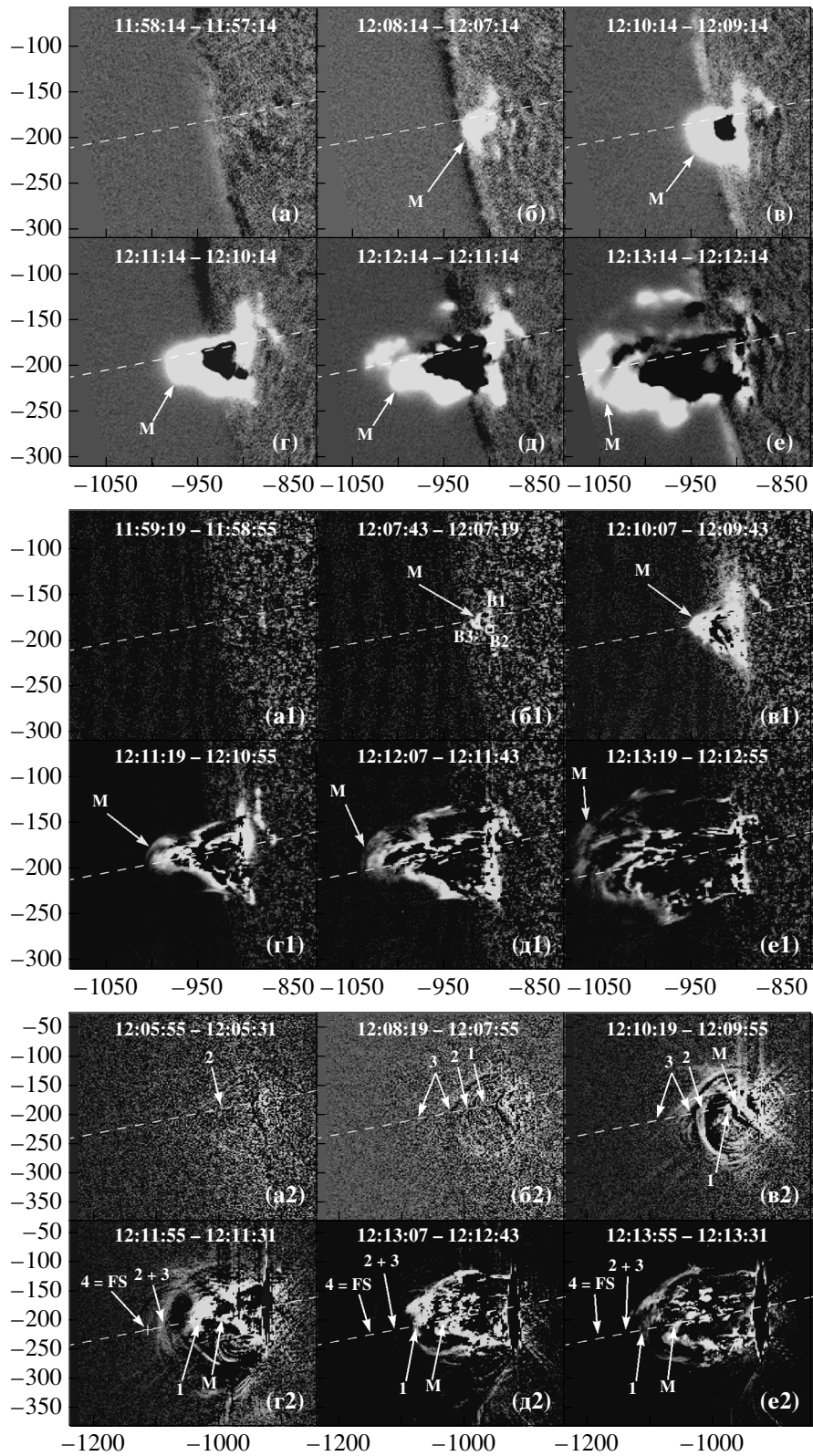
Рассматриваемое событие произошло в активной области AO 12151 (гелиографические координаты S07 и >E60), сопровождалось вспышкой класса M5.9 в 12 : 00 UT 24 августа 2014 г. Координаты места возникновения вспышки S07 и E78, т.е. событие было расположено близко к лимбу и на видимой части диска.

Для оценки хода развития этого КВМ рассмотрим динамику во времени по изображениям сначала “холодных” каналов 1700 Å ( $T \approx 5 \times 10^3$  К), 304 Å ( $T \approx 5 \times 10^4$  К) и линии 6562.8 Å ( $H\alpha$ ) ( $T \approx 8 \times 10^3$  К), а затем “горячего” канала 193 Å ( $T \approx 1.6 \times 10^6$  К и  $\approx 2 \times 10^7$  К) [23]. В других “корональных” каналах SDO/AIA (94, 171, 211 и 335 Å) наблюдения схожи с наблюдениями в канале 193 Å, и для краткости здесь не приведены.

Здесь важно отметить, что канал 1700 Å отражает полосу непрерывного спектра излучения поверхности Солнца в приближении абсолютного черного тела [23, 24]. В рамках такого приближения

<sup>1</sup> <http://gong2.nso.edu/>

<sup>2</sup> <http://jsoc.stanford.edu/ajax/lookdata.html>



**Рис. 1.** Разностные изображения развития “импульсного” КВМ в последовательные моменты времени: в линии H $\alpha$  (6562.8 Å) по данным NISP (a–e), в канале 1700 Å (a1–e1) и в канале 193 Å по данным SDO/AIA (a2–e2) 24 августа 2014 г. По осям отложены солнечные координаты в угловых секундах.

он позволяет оценить минимальную температуру фотосферы (области температурного минимума) на высотах  $\approx 400\text{--}600$  км [25]. Однако в спектре излучения Солнца в полосе длин волн данного канала также содержится множество эмиссионных линий, которые необходимо принимать во внимание [26, 27].

На рис. 1а–е показаны изображения бегущей разностной яркости в линии  $\text{H}\alpha$  для последовательных моментов времени, отражающих начальную фазу развития данного события. Штриховой линией показан позиционный угол  $PA = 101^\circ$ . В момент  $t = 11 : 58 : 14$  UT на изображении отсутствуют какие-либо возмущения (рис. 1а). Начиная с момента  $12 : 01 : 14$  UT (на рис. 1 этот момент отсутствует) и далее ( $12 : 08 : 14$  UT на рис. 1б) вблизи лимба на  $R \approx 0.97 R_\odot$  появляется яркий участок, обозначенный “М”, левая граница которого движется от Солнца (рис. 1в). Последующие изображения на рис. 1г–е показывают, что происходит движение и расширение яркой арочной структуры (оболочки), охватывающей полость. Фактически, это характерное поперечное сечение магнитной трубки (жгута) с плазмой (обозначено “М”), которую обычно называют активным протуберанцем. Аналогичным образом выглядит развитие процесса и в канале  $1700 \text{ \AA}$  (рис. 1а1–е1), но при этом заметно отличается от картины развития в горячем канале  $193 \text{ \AA}$  на рис. 1а2–е2, который будет рассмотрен ниже.

Отметим, что при активизации протуберанца, расположенного над поверхностью Солнца, его яркость может быть повышенной и возрастать в течение часа и более (при наблюдении на лимбе) или быть пониженной и уменьшаться (поскольку при наблюдении на диске протуберанец выглядит как волокно с пониженной яркостью) [28]. При этом он может какое-то время оставаться неподвижным, поскольку его активизация связана с возрастанием интенсивности турбулентного (или спиралевидного) движения или потоков вдоль него [28, с. 89].

В связи с этим нас будет интересовать количественное и качественное описание состояния исследуемого участка Солнца до возникновения исследуемого события и во время начальной фазы его развития. Это практически невозможно сделать путем визуального анализа изображений на рис. 1. Поэтому обратимся к рис. 2а,б, на котором представлены распределения разностной яркости  $\Delta P(R)$  линии  $\text{H}\alpha$ , построенные в направлении  $PA = 101^\circ$  (штриховая линия на рис. 1), для последовательных моментов времени 23–24 августа 2014 г.

На рис. 2а видно, что рост  $\Delta P(R)$  начинается после  $t = 12 : 04 : 14$  UT 24 августа 2014 г. В момент  $t = 12 : 06 : 14$  UT максимум разностной яр-

кости  $\Delta P_{\text{МАХ}}$  оболочки трубки “М” располагается на диске вблизи лимба на  $R \approx 0.97 R_\odot$  (ромбики, долгота  $\approx 78\text{E}$ ) и уже имеет радиальную скорость движения  $V > 35$  км/с.

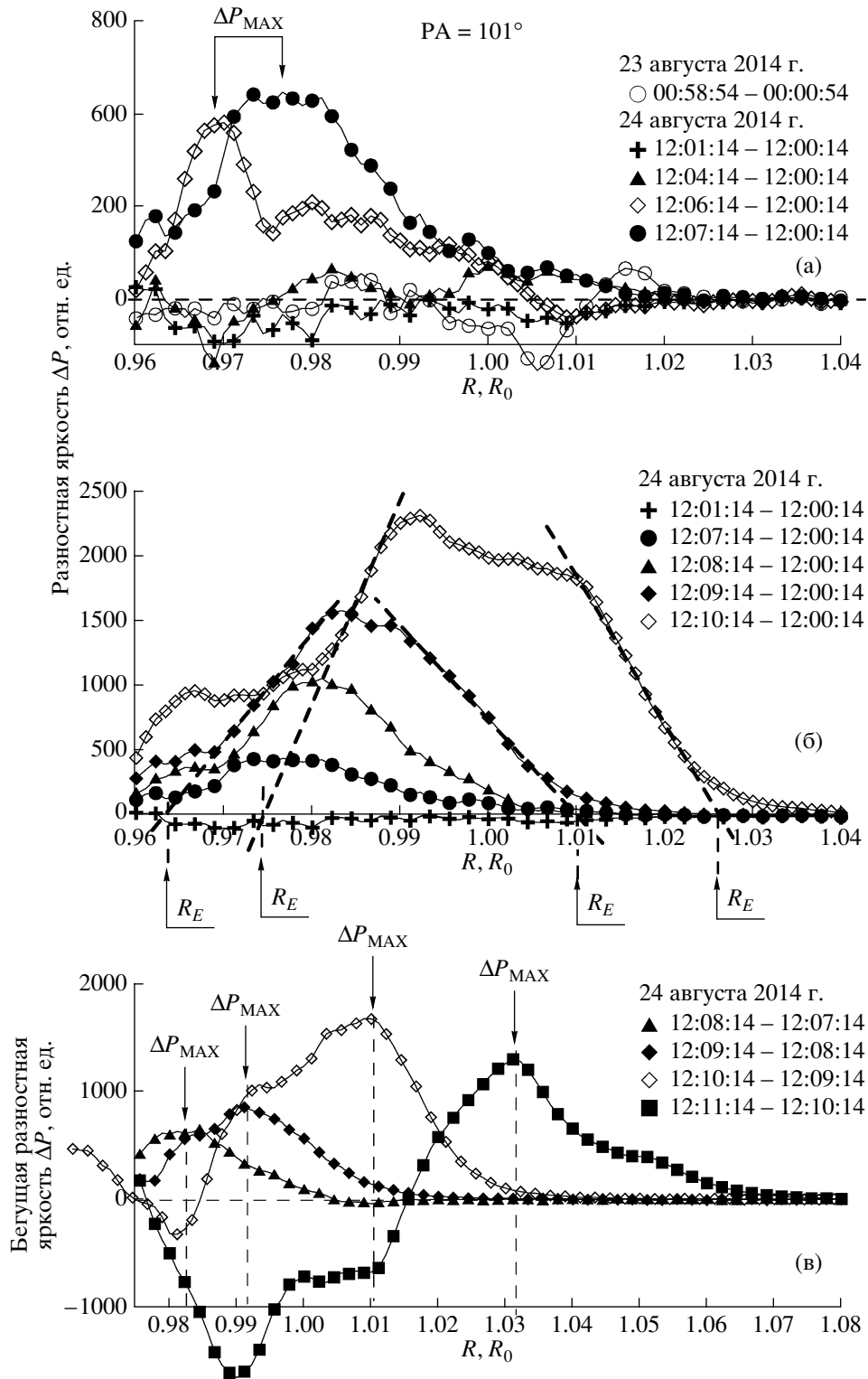
До появления максимума  $\Delta P_{\text{МАХ}}$  оболочки трубки “М” в течение нескольких часов на диске Солнца отсутствовали как минимум пониженной яркости, которому могло соответствовать волокно, так и максимум яркости вне диска на расстоянии  $R > 1.02 R_\odot$ , который мог быть связан с протуберанцем (крестики и черные треугольники на рис. 2а). Отсутствие протуберанца на лимбе на  $R > 1.02 R_\odot$  фиксируется в течение всего 23 августа 2014 г., когда долгота  $78\text{E}$  расположения максимума яркости  $\Delta P_{\text{МАХ}}$  за счет вращения Солнца проходила лимб в момент  $t \approx 12 : 00$  UT или была непосредственно за ним,  $t \approx 00 : 59$  UT (светлые кружки на рис. 2а). Колебания  $\Delta P$  в пределах  $\approx \pm 150$  отн.ед. определяются уровнем шума.

Здесь следует добавить, что об отсутствии протуберанца и волокна в течение 23–24 августа 2014 г. перед началом процесса в месте выброса свидетельствует также прямой визуальный анализ изображений полной яркости линии  $\text{H}\alpha$  и всех каналов SDO/AIA.

Все изложенное позволяет сделать предварительный вывод о том, что появление движущегося максимума разностной яркости  $\Delta P_{\text{МАХ}}$  может быть связано с выбросом изначально очень компактной ( $< 0.01 R_\odot$ ) магнитной трубки “М” с плазмой. При дальнейшем движении происходит уширение этого максимума и переднего фронта профиля  $\Delta P$ , что затрудняет определение величины скорости  $V$  движения трубки (см. светлые ромбики на рис. 2б). Чтобы уменьшить влияние этого эффекта при определении скорости  $V$ , использовались профили бегущей разностной яркости  $\Delta P$ , а в качестве характерной точки использовались максимумы  $\Delta P_{\text{МАХ}}$ , показанные на рис. 2в вертикальными стрелками, положения которых определяются достаточно точно. По ним затем строились кинематические кривые  $R(t)$ , представленные в разделе 3.3.

### 3.2. Оценка распределения температуры плазмы внутри выброшенной магнитной трубки

Для оценки распределения температуры плазмы внутри магнитной трубки “М” рассмотрим пространственные распределения бегущей разностной яркости, нормированные на  $\Delta P_{\text{МАХ}}$ , для нескольких различных каналов в УФ и в линии  $\text{H}\alpha$ . Выберем начальный момент времени  $t = 12 : 07 : 19$  UT, когда профили  $\Delta P(R)$  во всех этих каналах уже



**Рис. 2.** Распределения, построенные в направлении  $PA = 101^\circ$  (штриховая прямая на рис. 1), для последовательных моментов времени разностной яркости  $\Delta P(R)$  линии  $H\alpha$  (а, б) и бегущей разностной яркости  $\Delta P(R)$  линии  $H\alpha$  (в). Использованы данные NISP, полученные 23 и 24 августа 2014 г.

достаточно четко регистрируются и распространяются со скоростью  $V \approx 60\text{--}70$  км/с в радиальном направлении, но при этом еще остаются на диске Солнца. Моменты времени регистрации различных каналов несколько отличались (примерно на  $\Delta t \approx \approx 12$  с). Поэтому, с учетом скорости распространения  $V \approx 65$  км/с, различия  $\Delta t$  моментов регистрации в разных каналах были компенсированы соответствующим смещением профилей в пространстве на величину  $\pm R \approx \pm \Delta t \cdot V$  (т.е. в положительную или отрицательную сторону в зависимости от знака  $\Delta t$ ). Так, для  $t = 12 : 07 : 19$  UT величина  $\Delta R$  составила  $\Delta R = 0 R_{\odot}$  для  $1700 \text{ \AA}$ ,  $\Delta R = +0.002 R_{\odot}$  ( $H\alpha$ ),  $\Delta R = 0 R_{\odot}$  ( $304 \text{ \AA}$ ) и  $\Delta R = +0.002 R_{\odot}$  ( $193 \text{ \AA}$ ).

Результат приведения профилей к моменту  $t = 12 : 07 : 19$  UT показан на рис. 3а.

Наиболее широкий профиль  $\Delta P$  наблюдается в линии  $H\alpha$  (крестики) с максимумом, расположенным на  $R \approx 0.978 R_{\odot}$ . Линия  $H\alpha$  отражает характерную температуру плазмы  $T_{H\alpha} \approx (5 - 8) \times 10^3$  К [20]. Внутри на  $R \approx 0.98 R_{\odot}$  наблюдается максимум “М” узкого профиля канала  $1700 \text{ \AA}$  (светлые кружки). Он отражает температуру  $T_{1700} \approx 5 \times 10^3$  К [21]. Перед ним на  $R \approx 0.983 R_{\odot}$  располагается узкий пик канала  $193 \text{ \AA}$  (черные кружки, выделен горизонтальной штриховкой), который соответствует температурам  $T_{193} \approx 1.6 \times 10^6$  К и  $\approx 2 \times 10^7$  К [21].

Наблюдаемая картина может иметь следующую интерпретацию. Имеет место выброс магнитной трубки, заполненной плазмой, с температурой  $T \approx \approx (5\text{--}8) \times 10^3$  К, вероятнее всего, из области с минимальной температурой. При этом внутреннее ядро этой плазмы, возможно, более холодное и имеет  $T < 5 \times 10^3$  К. При движении над фотосферой в результате прогрева температура внешней оболочки холодного ядра возрастает до  $T > 10^6$  К.

Самое интересное, что в последующее время, например, в момент  $t = 12 : 10 : 55$  UT на рис. 3б, подобная картина сохраняется и даже усиливается. Внутри профиля  $H\alpha$  (крестики) на  $R \approx 1.02 R_{\odot}$  располагается максимум узкого профиля  $1700 \text{ \AA}$  (светлые кружки). Профили всех остальных линий располагаются перед профилем  $1700 \text{ \AA}$ . Это  $304 \text{ \AA}$  (светлые треугольники,  $T_{304} \approx 5 \times 10^4$  К);  $1600 \text{ \AA}$  (сплошные ромбики,  $T_{1600} \approx 10^5$  К);  $193 \text{ \AA}$  (черные кружки, выделен наклонной штриховкой,  $T_{193} \approx 1.6 \times 10^6$  и  $\approx 2 \times 10^7$  К). Таким образом, в окрестности  $R \approx 1.02 R_{\odot}$  существует ядро с весьма холодной плазмой, температура которой  $T$ , возможно,  $< 5 \times 10^3$  К. Внешняя же оболочка этой плазмы между  $R \approx 1.022 R_{\odot}$  и  $R \approx 1.055 R_{\odot}$  более

горячая и вносит вклад в излучение каналов с температурами от  $T_{1700} \approx 5 \times 10^3$  и до  $T_{193} > 10^6$  К.

Более точный ответ может дать количественный анализ значений яркости в различных каналах.

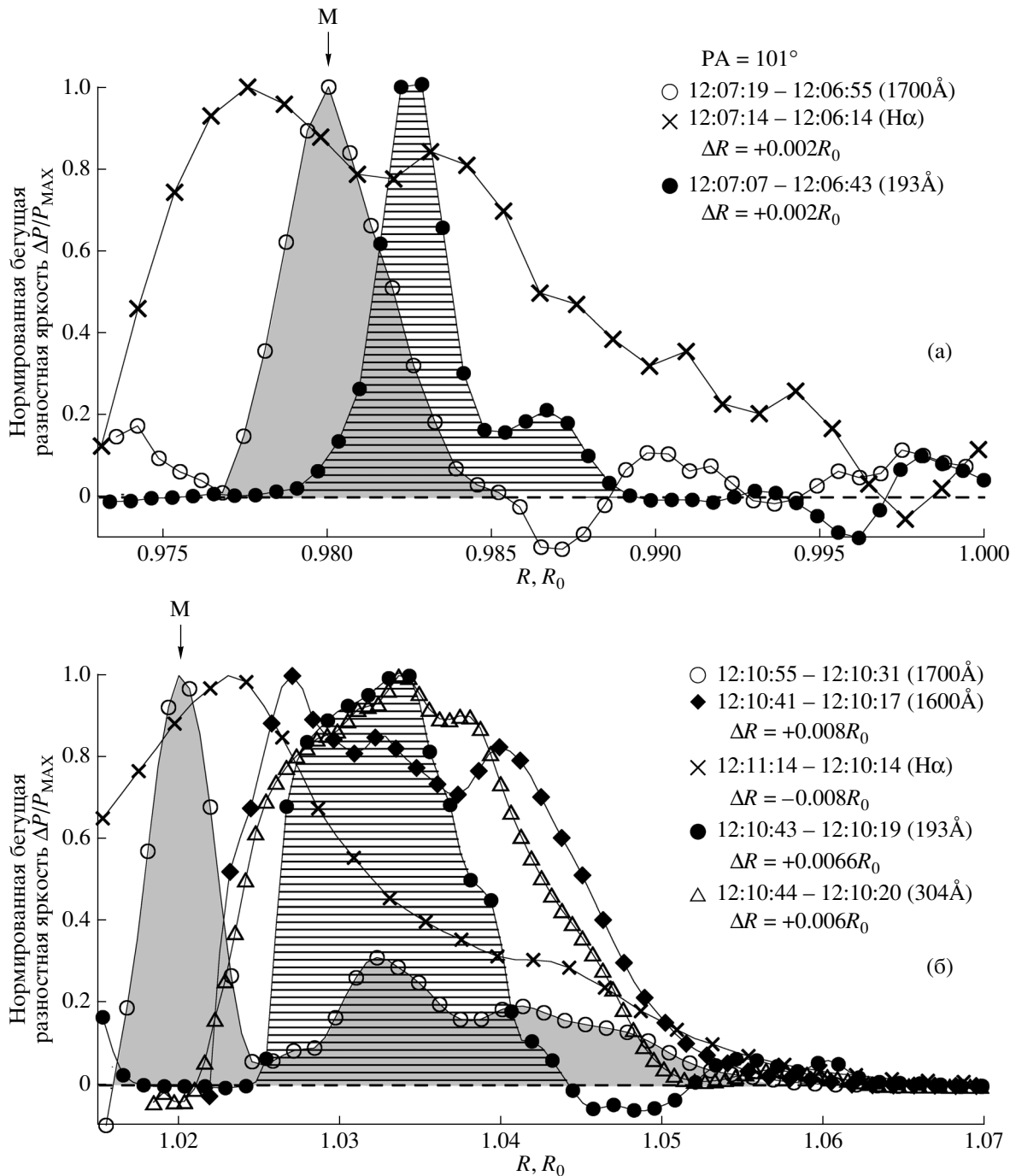
### 3.3. Динамика возникновения КВМ в “горячем” канале $193 \text{ \AA}$

Принципиальным отличием развития процесса в “горячем” канале  $193 \text{ \AA}$  является то, что, кроме регистрации прогретой оболочки выброшенной магнитной трубки с холодной плазмой, в нем можно наблюдать и другие особенности формирования КВМ в короне.

На рис. 1а2–е2 показаны изображения бегущей разностной яркости в канале  $193 \text{ \AA}$  для шести последовательных моментов времени, отражающих начальную и последующие фазы развития данного события. Штриховой линией показан позиционный угол  $PA = 101^\circ$ . Начальная фаза характеризуется развитием двух взаимосвязанных процессов, имеющих разные места локализации. Первый процесс начинается после  $t \approx 12 : 05 : 14$  UT 24 августа 2014 г. Как было показано выше, при анализе рис. 1 и рис. 2, он связан с выбросом из конвективной зоны магнитной трубки “М” с холодной плазмой. На рис. 1а2–е2 она также отмечена буквой “М”. Второй процесс начинается почти одновременно с началом выброса трубки “М”. На изображениях рис. 1а2–е2 он проявляется как усиление яркости четырех вложенных друг в друга арочных структур 1, 2, 3 и 4. При этом их положение остается неизменным, примерно, до момента  $\approx 12 : 10 : 19$  UT (рис. 1в2). Эти структуры представляют собой поперечное сечение магнитного жгута, два основания которого укоренены на фотосфере, расположенного на краю АО 12151, аналогичного наблюдавшимся в работе [4].

Для более детального рассмотрения арочных структур и их динамики на рис. 4 представлены распределения разностной яркости  $\Delta P(R)$  в канале  $193 \text{ \AA}$ , построенные в направлении  $PA \approx 101^\circ$ , для последовательных моментов времени при  $t_0 = 12 : 00 : 07$  UT.

На рис. 4а для двух последовательных моментов времени видно, что пик разностной яркости  $\Delta P$ , связанный с магнитной трубкой “М”, заметно растет по амплитуде, уширяется, а его правая граница распространяется в радиальном направлении. На ее пути располагаются арочные структуры 1, 2, 3 и 4. Структура 1 оставалась неподвижной до момента  $\approx 12 : 07 : 07$  UT (этот момент на рис. 4а не показан) и начала двигаться, когда правая граница трубки “М” приблизилась к ней (рис. 4а, светлые и черные кружки). Воздействие на структуру 1

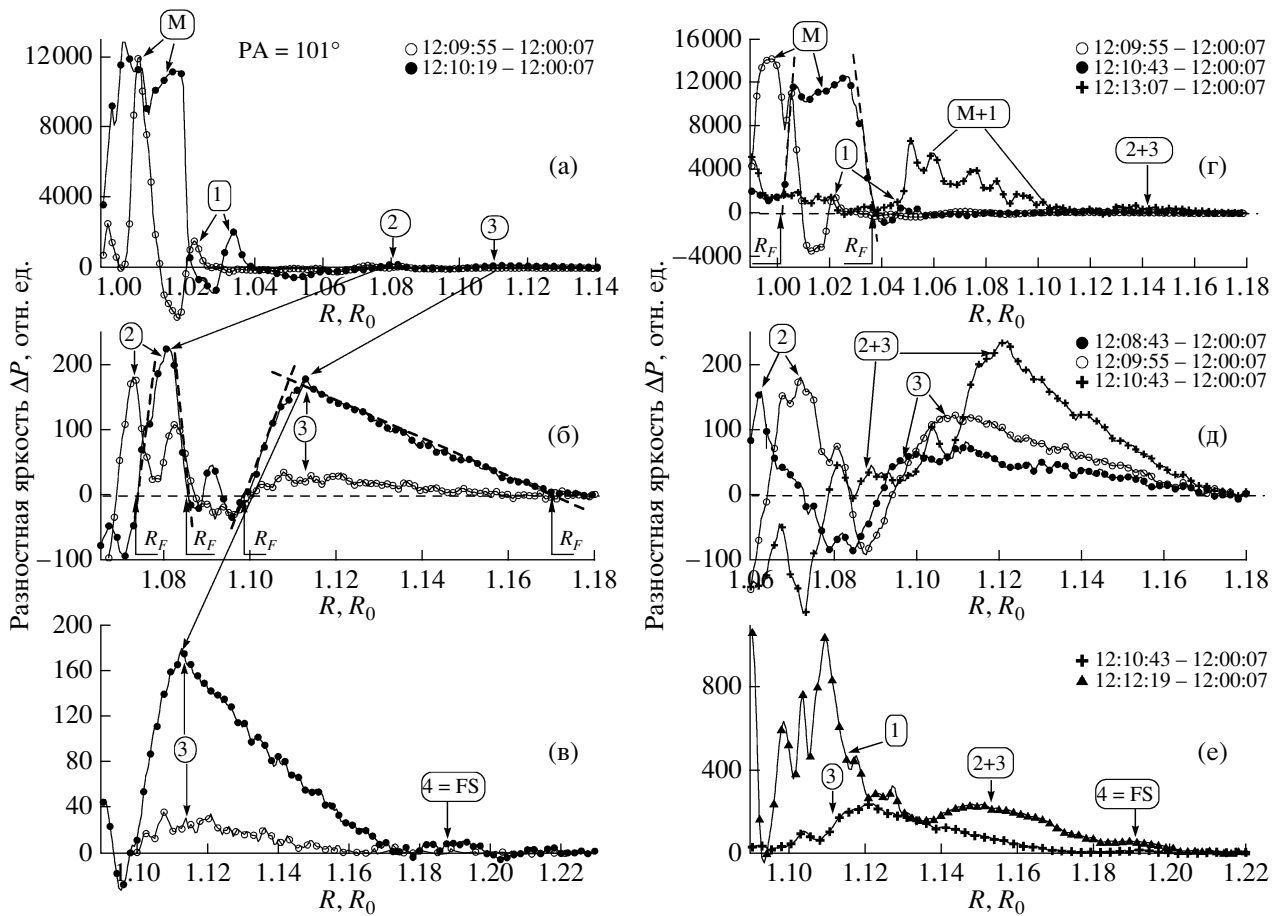


**Рис. 3.** Распределения бегущей разностной яркости, построенные в направлении  $PA = 101^\circ$  и нормированные на максимум разностной яркости  $\Delta P_{\text{MAX}}$ , для нескольких каналов УФ и линии H $\alpha$ , приведенные к двум различным моментам времени регистрации канала 1700 Å: а –  $t \approx 12:07:19-12:06:55$  UT; б –  $t \approx 12:10:55-12:10:31$  UT. Значки соответствуют следующим длинам волн: черные кружки – 193 Å, светлые треугольники – 304 Å, крестики – H $\alpha$ , черные ромбики – 1600 Å, светлые кружки – 1700 Å. Использованы данные SDO/AIA и NISP, полученные 24 августа 2014 г.

происходит через сжатие трубки “М” окружающего коронального магнитного поля. Последующее движение “М” (светлые и черные кружки на рис. 4г) приводит к тому, что “М”, столкнувшись с

1, сливается с ней, образуя новую структуру “М + 1” (крестики на рис. 4г).

Вследствие большой разницы амплитуд трубки “М” и структур 2, 3, 4, последние на рис. 4а практически не различимы. Поэтому на рис. 4б



**Рис. 4.** Распределения разностной яркости  $\Delta P(R)$  в канале  $193 \text{ \AA}$ , построенные в направлении  $PA = 101^\circ$ , для последовательных моментов времени при  $t_0 = 12 : 00 : 07 \text{ UT}$  (а, г, д, е). На рисунках б и в представлены те же моменты времени, что и на а, на более растянутом пространственном масштабе и при большей чувствительности шкалы  $\Delta P$ . Использованы данные SDO/AIA, полученные 24 августа 2014 г.

на более растянутом пространственном масштабе и с большей чувствительности шкалы  $\Delta P$  более четко показаны профили структур 2 и 3, а на рис. 4в — профили структур 3 и 4. Структура 2, оставаясь неподвижной и увеличивая свою разностную яркость  $\Delta P$ , начала движение только после  $12 : 09 : 07 \text{ UT}$  (рис. 4б). Рост разностной яркости неподвижной структуры 3 происходил до момента  $12 : 10 : 19 \text{ UT}$  (светлые и черные кружки на рис. 4в), после чего началось ее движение (черные кружки и крестики на рис. 4д). При этом к последующему моменту  $12 : 10 : 43 \text{ UT}$  (крестики на рис. 4д) структура 2 настигла структуру 3 и слилась с ней, образуя новую структуру 2+3. Наконец, к моменту  $12 : 12 : 19 \text{ UT}$  структура 2+3 начинает оказывать воздействие на структуру 4 (черные треугольники на рис. 4е), которая затем становится основой фронтальной структуры (FS) КВМ.

Более детально этот процесс рассмотрен на рис. 5. На рис. 5а видно, что структура 1 догоняет

слившуюся ранее структуру 2+3, вызывая ее движение. В свою очередь структура 2+3 воздействует на структуру 4=FS, вызывая ее движение. Постепенно структура 4=FS уходит вперед (отрывается) от структуры 2+3, становясь фронтальной структурой КВМ (см. рис. 5в).

Изложенная качественная картина формирования импульсного КВМ, включающая в себя два взаимосвязанных процесса, имеющих разные локализации, более четко видна на кинематических кривых  $R(t)$  трубки “М” и структур 1, 2, 3, 4, представленных на рис. 6.

На рис. 6а двумя жирными штриховыми линиями со светлыми кружками показаны границы  $R_F$  и  $R_E$  профилей разностной яркости трубки “М” в линии  $H\alpha$ , определенные по пересечениям наклонных штриховых прямых с осью  $R$  (см. рис. 2б), характеризующих основную массу выброшенной плазмы. Черные кружки со сплошной жирной кривой на рис. 6а,б построены по максимумам  $P_{\text{MAX}}$  на профилях бегущей разностной яркости  $H\alpha$  (рис. 2в).



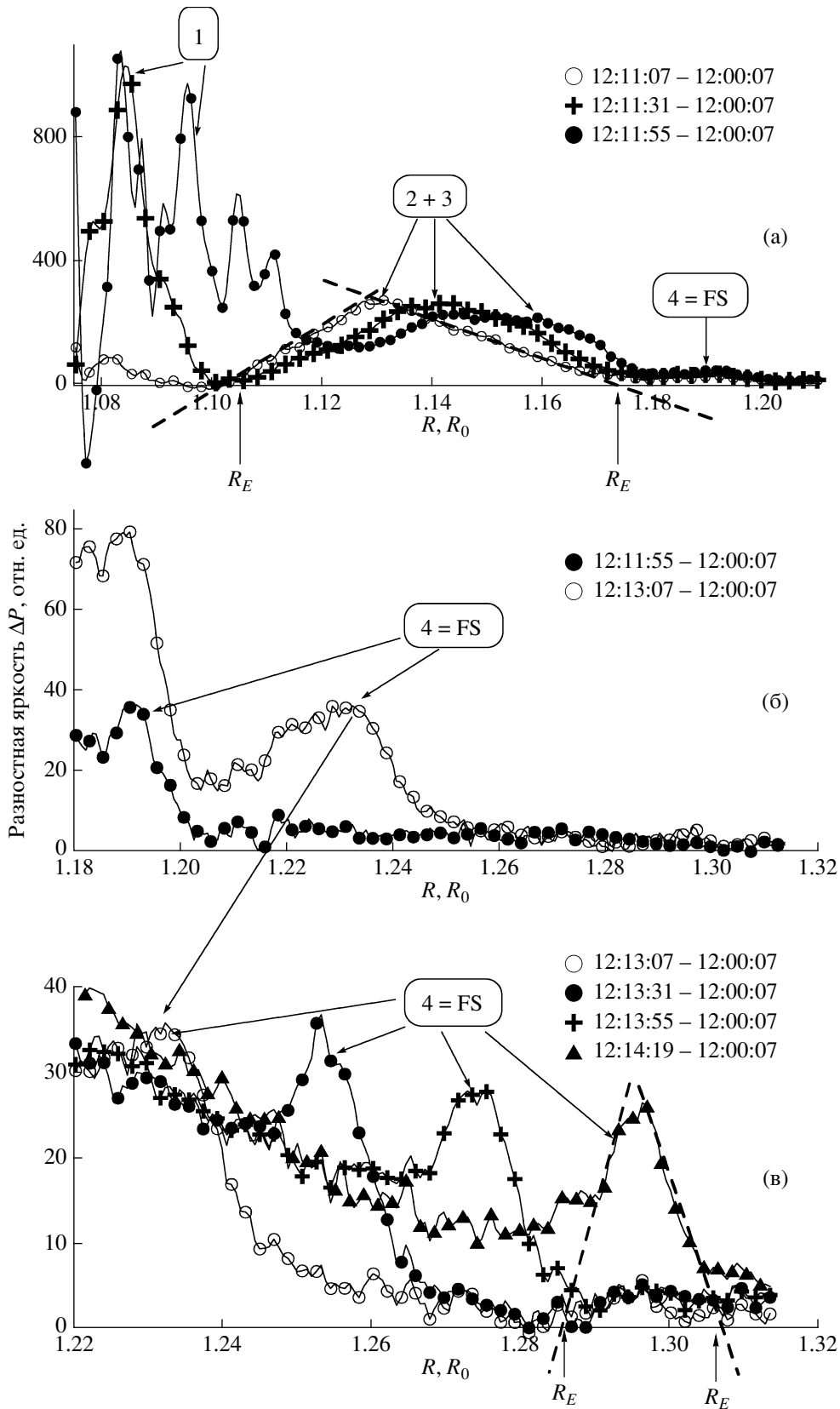
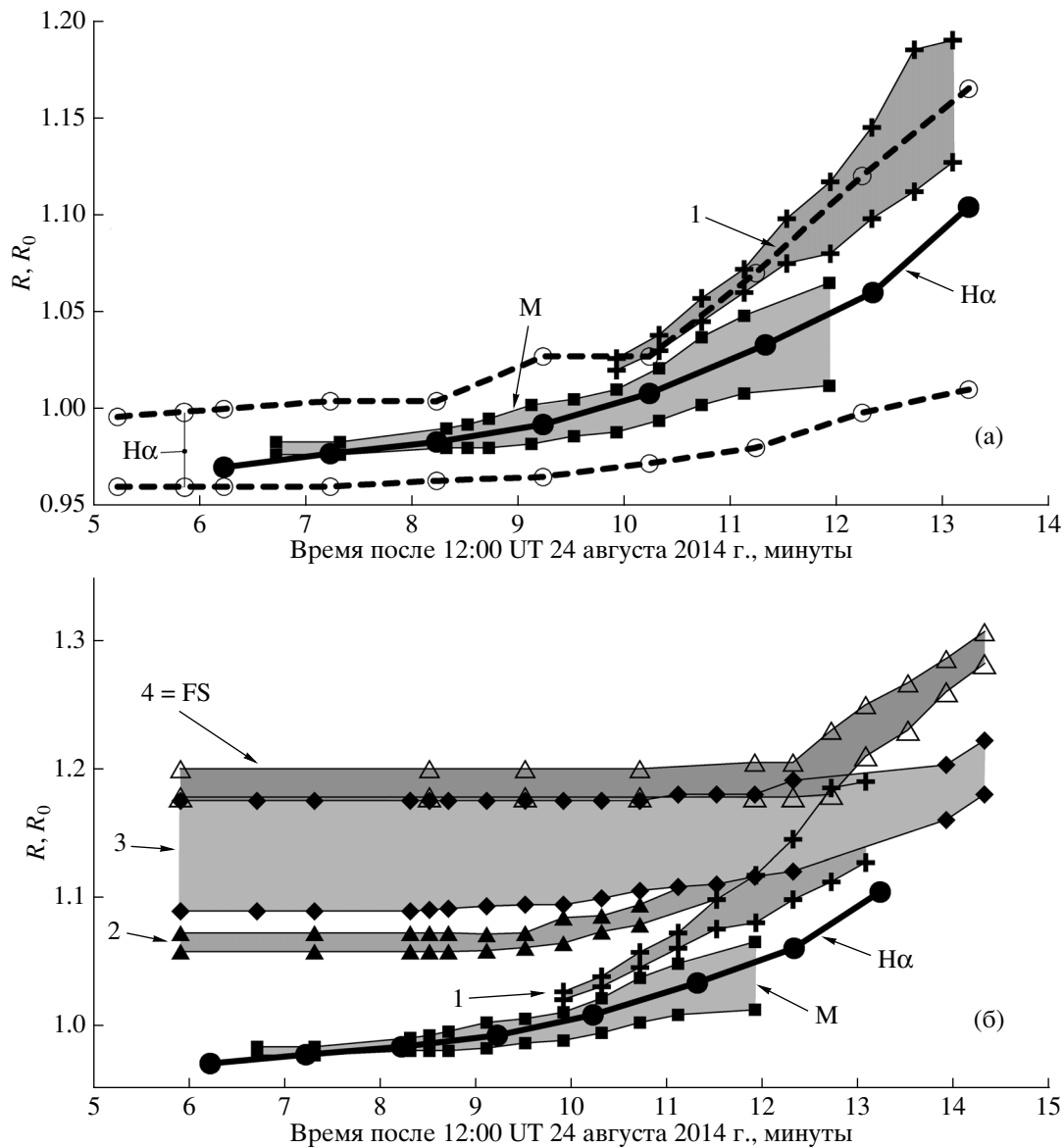


Рис. 5. Распределения разностной яркости  $\Delta P(R)$  в канале  $193 \text{ \AA}$ , построенные в направлении  $PA = 101^\circ$ , для последовательных моментов времени при  $t_0 = 12 : 00 : 07 \text{ UT}$ , соответствующих стадии формирования фронтальной структуры (FS) КВМ. Использованы данные SDO/AIA, полученные 24 августа 2014 г.



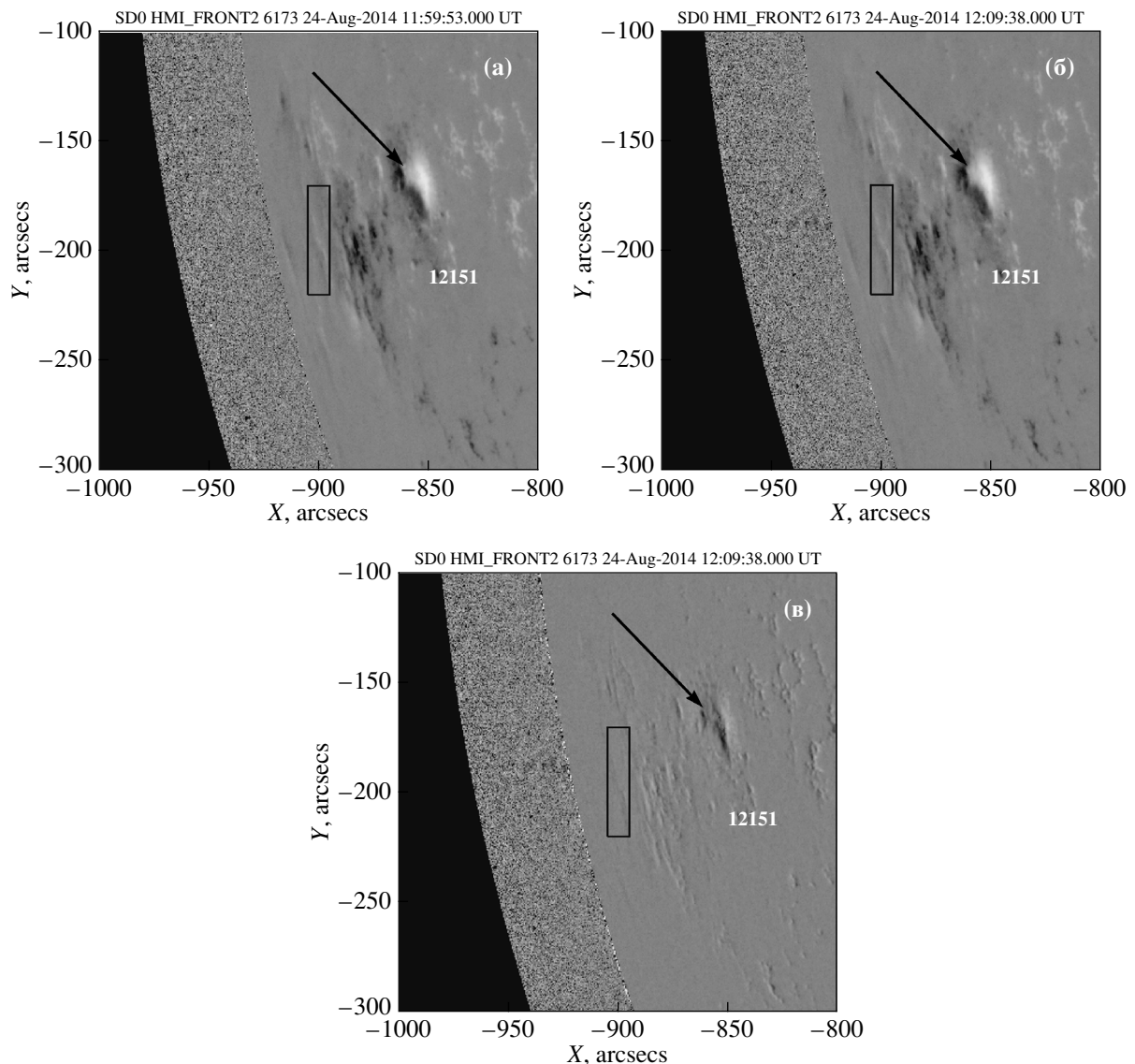
**Рис. 6.** Зависимости от времени расстояния  $R$  от центра Солнца магнитной трубки “М” и четырех корональных арочных структур 1, 2, 3, 4. а — Границы  $R_F$  и  $R_E$  профилей разностной яркости в линии  $H\alpha$  (светлые кружки с жирными штриховыми линиями) и положения максимумов  $\Delta P_{MAX}$  на профилях бегущей разностной яркости в линии  $H\alpha$  трубки “М” (черные кружки со сплошной жирной линией), границы  $R_F$  и  $R_E$  профилей разностной яркости в канале  $193 \text{ \AA}$  трубки “М” (черные квадратик) структуры 1 (крестики). б — аналогичные построения по профилям канала  $193 \text{ \AA}$  для структуры 2 (черные треугольники), структуры 3 (черные ромбики) и структуры 4=FS (светлые треугольники).

В канале  $193 \text{ \AA}$  границы  $R_F$  и  $R_E$  для трубки “М” (определение дано на рис. 4б,г) показаны на рис. 6а,б маленькими черными кружками и тонкими сплошными линиями, между которыми горизонтальная штриховка, а для структуры 1 — крестиками и тонкими линиями, между которыми вертикальная штриховка. Аналогичные построения сделаны по профилям канала  $193 \text{ \AA}$  для структур 2, 3, 4 = FS на рис. 6б (соответственно, черные треугольники, черные ромбики и светлые треугольники).

Рассмотрение рис. 6 позволяет сделать следующие выводы, которые подтверждают сделанный выше качественный анализ:

а) Исследуемый процесс начинается с выброса магнитной трубки с плазмой, которая видна в линии  $H\alpha$ . Начальная скорость выброса около  $35 \text{ км/с}$ . Некоторая часть плазмы (связанная с ее оболочкой) прогревается до температуры  $T > 10^6 \text{ К}$  (рис. 6а).

б) Передний фронт трубки “М”, сталкиваясь с



**Рис. 7.** Изображения фотосферных магнитограмм компонента магнитного поля Солнца, параллельного лучу зрения, по данным SDO/HMI для события 24.08.2014 в активной области 12151 для моментов времени 11 : 59 : 53 UT (а) и 12 : 09 : 38 UT (б); в – разностная магнитограмма (б)–(а). Черным прямоугольником выделена область, соответствующая подножиям выброшенной магнитной трубки (см. рис. 1). Черной стрелкой показана квазистационарная биполярная структура.

корональной структурой 1, вызывает ее движение (рис. 4а).

в) Структуры 2, 3, 4 остаются в покое, пока движущаяся трубка “М” вместе со структурой 1 не приблизится к ним. В дальнейшем все структуры, испытывая давление трубки, приходят в движение и постепенно сливаются в единую структуру, движущуюся вместе с трубкой.

а) Последняя структура 4 получает наибольшую скорость и становится основой будущей фронтальной структуры КВМ.

Возможны, по крайней мере, две интерпретации полученного результата.

1. Магнитный жгут с холодным ядром ( $T < 6000$  К) до начала события покоился над фотосферой и не был видим. В результате потери устойчивости жгут начал подниматься вверх, расширяться и слегка нагреваться, в результате чего его яркость в каналах 1600 и 1700 Å увеличилась, и он стал заметным на фоне окружающего пространства.

2. Трубка с ядром более холодной ( $T < 6000$  К) плазмы относительно фотосферы ( $T \approx 6000$  К) была выброшена снизу непосредственно во время наблюдаемого события.

Одной из важных проверок справедливости ин-

терпретации (1) или (2) является измерение магнитного поля на фотосфере в окрестности основания КВМ. В случае всплывающей из-под фотосферы магнитной трубки можно ожидать заметное изменение величины магнитного поля и появление новой меняющейся (по сравнению с квазистационарной) биполярной структуры магнитного поля. Также возможно возникновение течений вещества.

### 3.4. Фотосферное магнитное поле на стадии формирования КВМ

Для получения доказательства (или опровержения) возможного быстрого всплывания магнитной трубки был проведен анализ данных HMI/SDO. На рис. 7 в качестве примера представлены магнитограммы компонента поля, параллельного лучу зрения, для двух моментов времени — перед началом выброса в момент 11 : 59 : 53 UT (рис. 7а) и в 12 : 09 : 38 UT на стадии развития выброса (рис. 7б). Белый цвет соответствует положительной полярности, черный — отрицательной. На рис. 7в представлено разностное изображение: (б)–(а). Момент времени рис. 7б примерно соответствует моментам развития выброса, показанным на рис. 1в (в линии  $H\alpha$ ) и рис. 1в1 (в канале 1700 Å). Как видно из рис. 7 для моментов а и б (т.е. до и в процессе развития КВМ) нет существенных изменений квазистационарной биполярной структуры продольного лучу зрения магнитного поля (показана стрелкой). Отличия не наблюдались для всех предыдущих моменту рис. 7б последовательных моментов времени с интервалом 45 с. Но самое главное — на всем рассматриваемом временном интервале в активной области не было зарегистрировано возникновения новой биполярной структуры, которая должна была бы появиться в случае, если бы выброс трубки происходил не с поверхности Солнца, а из-под фотосферы.

Анализ величины полного компонента магнитного поля перед выбросом в момент 12 : 00 : 00 UT и на стадии развития в 12 : 12 : 00 UT показал, что значения магнитного поля остаются неизменными с точностью до  $\pm 50$  Гс. Анализ доплерограмм также не показал существенных изменений на фотосфере в области выбрасываемой трубки (черный прямоугольник на рис. 7).

Эти результаты свидетельствуют в пользу того, что магнитная трубка была выброшена из слоев, лежащих над фотосферой. Вопрос о возникновении и формировании этой структуры требует дополнительного исследования, выходящего за рамки данной работы.

## 4. ВЫВОДЫ

1. Показано, что формирование “импульсного” КВМ 24 августа 2014 г. связано с появлением магнитной трубки (жгута), движущейся со скоростью  $\approx 35$  км/с и содержащей более холодную плазму, чем в фотосфере.

2. При движении в короне магнитная трубка сталкивается и ускоряет (приводит в движение) квазистационарный корональный магнитный жгут. Результатом такого взаимодействия является формирование КВМ, фронтальной структурой которого является поверхность коронального магнитного жгута.

3. На стадии формирования в окрестности оснований данного КВМ на фотосфере не было зарегистрировано возрастания или изменения потока магнитного поля. Появления новой (по сравнению с квазистационарной) биполярной структуры магнитного поля также не обнаружено.

В проанализированном случае хорошо прослеживается движение и эволюция физических условий в жгуте на фоне всего КВМ, что не удавалось сделать ранее, и развитие явлений в короне в зависимости от напряженности и структуры магнитных полей в области над источником выброса из лежащих ниже слоев.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проекты 13-02-00202-а, 15-32-21078-мол-а-вед). Авторы благодарят команды инструментов SDO/AIA, SDO/HMI, NISP, данные которых использовались в этой работе.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. J. Krall, J. Chen, and R. Santoro, *Astrophys. J.* **539**, 964 (2000).
2. A. Thernisien, A. Vourlidas, and R. A. Howard, *Solar Phys.* **256**, 111 (2009).
3. N. R. Jr. Sheeley, H. Walter, Y.-M. Wang, and R. A. Howard, *J. Geophys. Research* **104**, A11, 24739 (1999).
4. S. Patsourakos, A. Vourlidas, and G. Stenborg, *Astrophys. J.* **764**, 125 (2013).
5. A. J. Hundhausen, in *The Many Faces of Sun. Scientific Highlights of the Solar Maximum Mission*, edited by K. T. Strong, J. T. Saba, and B. M. Haisch (High Altitude Observatory National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO, Springer-Verlag, 1994).
6. A. Bemporad, J. Raymond, G. Poletto, and M. Romoli, *Astrophys. J.* **655**, 576 (2007).
7. V. G. Eselevich and M. V. Eselevich, *Geomagnetism and Aeronomy* **51**, 1083 (2011).
8. S. K. Antiochos, C. R. DeVore, and J. A. Klimchuk, *Astrophys. J.* **510**, 485 (1999).
9. T. Amari, J. F. Luciani, Z. Mikic, and J. Linker, *Astrophys. J.* **529**, L49 (2000).

10. T. Magara and D. W. Longcope, *Astrophys. J.* **559**, L55 (2001).
11. S. E. Gibson, D. Foster, J. Burkepile, G. de Toma, and A. Stanger, *Astrophys. J.* **641**, 590 (2006).
12. V. Archontis and A. W. Hood, *Astrophys. J.* **647**, L113 (2008).
13. F. Moreno-Insertis, M. Schussler, and A. Ferris-Mas, *Astron. and Astrophys.* **264**, 686 (1992).
14. S. V. Alekseenko, G. I. Dudnikova, V. A. Romanov, D. V. Romanov, and K. V. Romanov, *Rus. J. Engineering Thermophysics* **10**, 243 (2000).
15. В. А. Романов, Д. В. Романов, К. В. Романов, *Астрон. журн.* **70**, 1237 (1993).
16. В. А. Романов, Д. В. Романов, К. В. Романов, *Астрон. журн.* **70**, 1247 (1993).
17. М. В. Еселевич, В. Г. Еселевич, В. А. Романов, Д. В. Романов, К. В. Романов, *Известия Крымской астрофиз. обсерв.* **109**, 3, 1 (2013). *Bull. Crimean Astrophys. Observ.* **109**, 1 (2013).
18. В. Г. Еселевич, М. В. Еселевич, *Астрон. журн.* **91**, 320 (2014).
19. М. В. Еселевич, В. Г. Еселевич, *Космич. исслед.* **53**, 24 (2015).
20. В. Г. Еселевич, М. В. Еселевич, *Астрон. журн.* **90**, 936 (2013).
21. J. R. Lemen, A. M. Title, D. J. Akin, P. F. Boerner, C. Chou, J. F. Drake, D. W. Duncan, C. G. Edwards, F. M. Friedlaender, G. F. Heyman, N. E. Hurlburt, N. L. Katz, G. D. Kushner, M. Levay, R. W. Lindgren, D. P. Mathur, E. L. McFeaters, S. Mitchell, R. A. Rehse, C. J. Schrijver, L. A. Springer, R. A. Stern, T. D. Tarbell, J.-P. Wuelser, C. J. Wolfson, C. Yanari, J. A. Bookbinder, P. N. Cheimets, D. Caldwell, E. E. Deluca, R. Gates, L. Golub, S. Park, W. A. Podgorski, R. I. Bush, P. H. Scherrer, M. A. Gummin, P. Smith, G. Aufer, P. Jerram, P. Pool, R. Soufli, D. L. Windt, S. Beardsley, M. Clapp, J. Lang, and N. Waltham, *Solar Phys.* **275**, 17 (2012).
22. P. H. Scherrer, J. Schou, R. I. Bush, A. G. Kosovichev, R. S. Bogart, J. T. Hoeksema, Y. Liu, T. L. Duvall Jr., J. Zhao, A. M. Title, C. J. Schrijver, T. D. Tarbell, and S. Tomczyk, *Solar Phys.* **275**, 207 (2012).
23. J. E. Vernazza, E. H. Avrett, and R. Loeser, *Astrophys. J.* **184**, 605 (1973).
24. Э. Гибсон, *Спокойное Солнце* (М.: Мир., 1977), с. 125.
25. J. E. Vernazza, E. H. Avrett, and R. Loeser, *Astrophys. J.* **30**, 1 (1976).
26. D. Samain, R. M. Bonnet, R. Gayet, and C. Lizarbert, *Astron. and Astrophys.* **39**, 71 (1975).
27. G. D. Sandlin, J.-D. F. Bartoe, G. E. Brueckner, R. Touusey, and M. E. Vanhoosier, *Astrophys. J. Suppl.* **61**, 801 (1986).
28. Э. Прист, *Солнечная магнитогидродинамика* (М.: Мир, 1985).