

УДК 523.987

КРУПНОМАСШТАБНЫЕ ЯВЛЕНИЯ НА СОЛНЦЕ, СВЯЗАННЫЕ С ЭРУПЦИЕЙ ВОЛОКОН ВНЕ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ: СОБЫТИЕ 12.09.1999

© 2009 г. И. М. Черток¹, В. В. Гречнев², А. М. Уралов²

¹Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова, Троицк, Россия

²Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения
Российской академии наук, Иркутск, Россия

Поступила в редакцию 2008 г.; принята в печать 02.07.2008 г.

На примере события 12.09.1999 проанализированы крупномасштабные возмущения, связанные с корональными выбросами массы при эрупции волокон вне активных областей. Анализ основан на $H\alpha$ -фильтрограммах, изображениях крайнего УФ- и мягкого рентгеновского диапазонов, и данных коронографов. Эрупция волокна происходила в относительно слабых магнитных полях, но сопровождалась более масштабными явлениями, чем вспышечные события. После эрупции в течение нескольких часов развивалась крупномасштабная аркада, основаниями которой были расходящиеся ленты, подобные вспышечным. Объем события был ограничен “волной EIT”, квазистационарной на солнечной поверхности и расширяющейся над лимбом. Событие не имело импульсной компоненты, поэтому “волна EIT” над лимбом — магнитная структура, идентифицированная как фронтальная структура коронального выброса массы, в силу их совпадения по форме, структурным деталям и кинематике. В ареале события наблюдалось три типа диммингов, обусловленных (а) эвакуацией плазмы, (б) нагревом плазмы и ее последующей эвакуацией, (в) поглощением излучения в системе волокон, активизированных эрупцией. Факт возникновения димминга из-за нагрева плазмы был выявлен по данным мягкого рентгеновского диапазона, но он не обнаруживается по четырем каналам EIT. Это ставит вопрос о корректности некоторых выводов, сделанных ранее только по данным EIT. Обусловленные эрупцией трансформации магнитных полей имели место также в стационарной корональной дыре, примыкавшей к ареалу события. Расширение коронального выброса массы является автономным и характеризуется быстро уменьшающимся ускорением, что не учитывается широко используемой полиномиальной аппроксимацией.

PACS: 96.60.qf, 96.60.ph

1. ВВЕДЕНИЕ

Эрупция крупных корональных выбросов массы (КВМ) на Солнце сопровождается рядом масштабных явлений — диммингами, волнами Мортонна и подобными им корональными возмущениями, постэруптивными аркадами, опирающимися в яркие протяженные ленты, и т.д. (см., например, [1, 2]). Масштабы этих явлений соизмеримы с солнечным радиусом.

Димминги — это области, в которых яркость корональных структур в мягком рентгеновском и крайнем УФ-диапазонах понижается на время от нескольких часов до суток. Они образуются в окрестности центра эрупции при выбросе и могут также наблюдаться на значительной части поверхности Солнца и вблизи нее [3–9]. Первоначально их называли “транзиентными корональными дырами”, но последующие исследования показали,

что их природа может быть различной. Стационарные димминги, примыкающие к центру эрупции, предположительно отождествляются с основаниями магнитных структур (жгутов), связанных с КВМ. Понижение яркости в диммингах объясняют уменьшением продольной меры эмиссии n^2L за счет снижения концентрации плазмы в располагающихся в них корональных структурах. Возможные механизмы — истечение плазмы из раскрывшихся в межпланетное пространство магнитных структур, связанных с КВМ [10, 11], снижение нагрева в верхних частях корональных петель и притока плазмы в их основания снизу [12], расширение не претерпевших эрупции структур, приводящее к уменьшению n^2L при неизменном количестве частиц в них [13]. Возможно и поглощение излучения в низкотемпературной плазме, поступившей из возмущенного волокна [13]. Первопричина всех

этих возможных процессов — изменение условий в короне в результате выброса.

Волны Мортонa наблюдаются на спектрогелиограммах в линиях $H\alpha$ [14] и $HeI \lambda 10830$ [15] как дугообразные возмущения, распространяющиеся от центра эрупции со скоростями 550–2500 км/с. Внешне подобные им корональные возмущения в крайнем УФ-диапазоне, а иногда и в мягком рентгеновском диапазоне, наблюдаются как слабо светящиеся фронты, либо распространяющиеся на большие расстояния с меньшими скоростями 250–800 км/с, либо квазистационарные [3, 16–24]. Эти возмущения наблюдаются как на солнечном диске, так и расширяющимися за его пределы. Обнаруженные при помощи телескопа SOHO/EIT, они получили общее название “волн EIT”, хотя, по-видимому, не все из них являются волнами как таковыми. Разнообразие наблюдательных данных об этих явлениях едва ли допускает возможность их единой интерпретации.

Объяснение приповерхностной “волны EIT” как внешней границы расширяющегося основания КВМ было предложено и развито в работах [16, 25, 26]. В данной модели “EIT волна” — это область пересоединения магнитных потоков КВМ и последовательно раскрывающихся магнитных структур у солнечной поверхности, т.е. она является и внешней границей расширяющегося димминга. В близкой по сути модели [27] используется обменное пересоединение магнитных потоков КВМ с “магнитным ковром” спокойного Солнца. Другие исследователи, опираясь на наблюдаемое в некоторых событиях кинематическое соответствие “волн EIT” и волн Мортонa, связывают оба типа явлений в таких событиях с единым замедляющимся возмущением, например, корональной взрывной ударной волной [13, 21, 28]. В отдельных случаях расширяющиеся над лимбом “волны EIT” были идентифицированы с фронтальными структурами КВМ [12, 29, 30]. Рассматриваются также некоторые комбинации этих вариантов [31, 32]. По-видимому, непосредственной причиной повышенной яркости возмущений волнового характера, наблюдаемых в линиях крайнего УФ-диапазона с относительно узким интервалом температуры, является повышение продольной меры эмиссии в области сжатия. Яркость же мягкого рентгеновского излучения прямо зависит и от концентрации, и от температуры плазмы.

На постэруптивной фазе формируются крупномасштабные аркады и протяженные светящиеся ленты в их основаниях. На этой стадии магнитное поле в обширной области короны, вздыбленное эрупцией КВМ, релаксирует к равновесному состоянию предположительно через магнитное пересоединение в протяженных, высоких токовых слоях.

Различают два класса эруптивных событий, связанных с КВМ: (1) вспышки (и эрупции волокон) в активных областях (АО) и (2) эрупции волокон (протуберанцев) вне АО [33]. Перечисленные крупномасштабные явления анализировались, главным образом, для эрупций в АО, связанных со вспышками. Именно таким событиям посвящено большинство процитированных работ. В то же время крупномасштабные возмущения при эрупциях вне АО недостаточно изучены. Например, мало что известно о наличии и характере “волн EIT” в таких событиях. Отдельные свойства крупномасштабных возмущений при таких эрупциях исследованы в немногих работах [12, 30, 34–39]. Между тем, анализ крупномасштабных возмущений при эрупциях вне АО важен не только для исследования физических особенностей этого класса явлений. Оба класса эрупций, по-видимому, подчиняются общим закономерностям, и наряду с их различиями, можно ожидать и ряда схожих черт. Представляя эрупцию волокна вне АО как замедленный вспышечно-подобный процесс без импульсной фазы [33], можно надеяться подробно исследовать некоторые процессы, протекающие и в эруптивных вспышках. Кроме того, КВМ, не связанные со вспышками, являются источниками заметных геомагнитных возмущений с индексом Dst до -200 нТл [40]. Поэтому изучение эрупций волокон вне АО и связанных с ними крупномасштабных возмущений важно и для прогнозирования космической погоды.

Нами проведен анализ крупномасштабных возмущений примерно для 100 эрупций вне АО за 1996–2006 гг. В настоящей статье результаты этого анализа и типичные характеристики крупномасштабных явлений представлены на примере хорошо наблюдавшегося в ряде диапазонов излучения события 12.09.1999. В разделе 2 описаны исходные данные и основной метод анализа. В разделах 3–6 рассмотрены обстоятельства эрупции волокна, свойства диммингов, постэруптивной аркады, вспышечно-подобных лент, КВМ и обнаруженного в этом событии коронального возмущения (“волны EIT”), которая в данном случае идентифицируется как фронтальная структура КВМ. Раздел 7 посвящен обобщению и обсуждению полученных результатов.

2. ДАННЫЕ И МЕТОДЫ АНАЛИЗА

При изучении события 12.09.1999 выполнен комплексный анализ разнообразных данных. Фильтрограммы $H\alpha$, полученные в обсерватории Биг-Бэр с интервалом до 30 с и любезно предоставленные В. Юрчишиным, позволили детально проследить эрупцию волокна. Для анализа фильтрограмм необходимы центровка изображений,

вычитание потемнения к краю и дополнительное контрастирование, для чего использовались компьютерные процедуры, имеющиеся в программном комплексе SolarSoft. Большое количество исходных фильтрограмм (свыше 500) при их крупном формате (2032 × 2028 пикс.) потребовало принятия мер для уменьшения времени на обработку.

На первом этапе изображения были уменьшены до формата 256 × 256. С помощью процедуры IDL `align_cube` (разработчик R. Molowny-Nogas) были найдены смещения каждого изображения относительно выбранного опорного. Затем с помощью процедуры `background` (A. McAllister) найден центр опорного изображения, уменьшенного вдвое, и далее каждое изображение центрировалось с помощью процедуры `align_cube` с использованием найденных на первом этапе сдвигов, домноженных на соответствующий коэффициент. При компоновке фильмов потемнение к краю находилось с помощью процедуры `background` для каждого 10-го изображения (для экономии времени), а для каждого из приведенных на рис. 1 изображений это сделано индивидуально. Наконец, для повышения контраста изображений использовалась процедура `sigrange` (W. Thompson).

Важнейшая для нашего исследования информация содержится в данных телескопа крайнего УФ-диапазона SOHO/EIT. Наблюдения на EIT ведутся в канале 195 Å (преобладающая линия Fe XII, характеристическая температура 1.3 МК) с интервалом 12 мин. Кроме того, с интервалом 6 ч EIT дает изображения еще в двух корональных каналах 171 Å (Fe IX/X, 0.9 МК) и 284 Å (Fe XV, 2.0 МК), а также в канале 304 Å, основной вклад в который дает излучение переходного слоя (He II, 0.02–0.08 МК и менее интенсивная корональная компонента Si XI, 1.6 МК) [29, 41].

Димминги, постэруптивная аркада и ленты в ее основаниях исследовались по изображениям, полученным в этих четырех каналах, которые соответствуют разным температурам. Фильтрограммы EIT в канале 195 Å позволили обнаружить и проанализировать в данном событии корональное возмущение, распространявшееся по диску и над лимбом. Возмущения проявились и на изображениях мягкого рентгеновского диапазона Yohkoh/SXT [42], соответствующих температурам выше 2.5 МК. Характеристики крупного KBM, связанного с рассматриваемым событием, изучались по данным коронографов белого света SOHO/LASCO на гелиоцентрических расстояниях от 2.5 до $32R_{\odot}$ [43].

Исходные файлы данных EIT и LASCO доступны по адресам <http://umbra.nascom.nasa.gov/eit/eit-catalog.html> и <http://lasco-www.nrl.navy.mil>

[/cgi-bin/lwdb/lasco/images/form](http://cgi-bin/lwdb/lasco/images/form). Рутинная обработка изображений SOHO/EIT выполнена с помощью процедуры `eit_prep` (J. Newmark). Предварительная обработка исходных данных телеметрии Yohkoh/SXT выполнена нами с помощью процедуры `sxt_prep` (M. Morrison) и требуемых баз данных Yohkoh.

Основной причиной недостаточной изученности крупномасштабных возмущений, связанных с эрупциями, является их низкий контраст, из-за чего эти явления почти неразличимы на изображениях, не подвергнутых специальной обработке. Поэтому для их обнаружения использовались разностные изображения с вычитанием фиксированного кадра до события и предварительной компенсацией вращения Солнца во всех изображениях (см., например, [6, 7]). Для выявления быстрых изменений (напр., “волн EIT”) использовались последовательные разностные изображений, формируемые вычитанием из каждого изображения предшествующего ему кадра. Кроме того, использовались и изображения без вычитания, подвергнутые глубокому контрастированию.

Для анализа KBM по данным LASCO также использовались фиксированные разностные изображения, но без компенсации солнечного вращения. Они позволили проследить развитие KBM в картинной плоскости в сравнении с изображением короны до эрупции. Из-за ограниченного объема статьи ниже приводятся самые необходимые иллюстрации. Дополнительные изображения и фильмы, иллюстрирующие рассматриваемое событие, представлены на сайте <http://helios.izmiran.troitsk.ru/lars/Chertok/990912/index.html>.

3. ЭРУПЦИЯ Nα ВОЛОКНА

Анализируемое Nα-волокно 1-2 (рис. 1а) было частью восточной ветви протяженного U-образного волокна, занимавшего значительную область юго-западного квадранта солнечного диска. В течение нескольких часов перед эрупцией наблюдались заметные изменения северной оконечности большого волокна 3, а после $\approx 22 : 15^1$ 11 сентября началось постепенное угасание промежуточной части волокна 2-3 (кадры “б”, “в”). Это угасание не имело никаких эруптивных признаков и, скорее всего, было обусловлено нагревом этой части волокна.

Первыми проявлениями приближающейся дестабилизации центральной части волокна 1-2 были

¹ Для всех моментов времени в данной статье указано время UT.

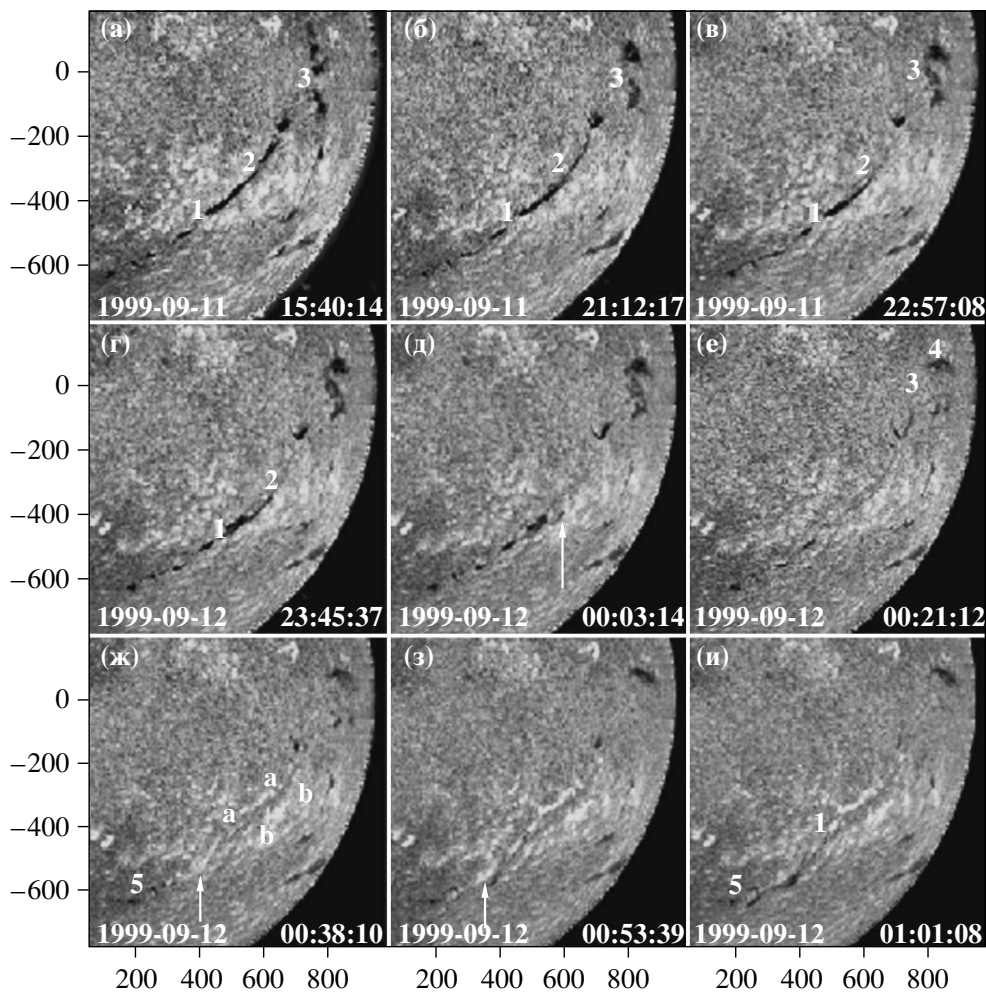


Рис. 1. α -фильтрограммы обсерватории Биг-Бэр, иллюстрирующие эволюцию и эрупцию волокна 1-2-3, а также динамику лент aa и bb на постэруптивной фазе. На этом и других аналогичных рисунках по осям указаны шкалы с расстоянием от центра диска в угловых секундах. Все эти и последующие изображения обработаны нелинейно для выделения обсуждаемых деталей.

хорошо видимые на фильме вариации его контраста, похожие на перемещение неких возмущений вдоль волокна. Затем, начиная с $\approx 23:00$, последовало постепенное отщепление западной компоненты (нитей) волокна 1-2 от оставшегося в исходном положении основного волокна и медленное смещение этой компоненты в юго-западном направлении (кадр "г"). На этой стадии за несколько десятков минут отщепленная компонента переместилась в картинной плоскости на небольшое расстояние, сравнимое с видимой шириной волокна. Более четкие и быстрые эруптивные явления наблюдались после $\approx 23:55$, когда начался отрыв и заметное перемещение на запад/северо-запад сначала нескольких небольших северных фрагментов волокна 1-2, а затем и всего этого волокна. На кадре "д" стрелкой отмечено положение одного из эруптивировавших фрагментов во-

локна на момент 00:03:14 12 сентября. По имеющимся фильтрограммам движение этого фрагмента прослеживается до $\approx 00:15$, когда он сместился на 45 тыс. км относительно предэруптивного положения. Анализ кинематики этих фрагментов и эруптивных структур в крайнем УФ-диапазоне, а также компонент КВМ представлен в разделе 6. К 00:20–00:21 процесс привел почти к полному исчезновению не только основного волокна 1-2, но и его продолжения вплоть до северной оконечности 3 (кадр "е"), где также наблюдались заметные движения западной волоконной ветви. Расположенный еще севернее волоконный компонент 4 не был частью исследуемого U-образного волокна и соответствовал другой расположенной поблизости линии смены полярностей магнитного поля. Однако и этот компонент испытал воздействие возмущений от эрупции волокна 1-2-3: после нее в

течение длительного времени в каналах $H\alpha$ и 195 \AA наблюдалось перетекание темного вещества в этом волокне.

На последующей фазе в линии $H\alpha$ наблюдались два основных явления, развитие которых иллюстрируется на рис. 1 кадрами “ж”–“и”. Во-первых, начиная с 00:24, по обе стороны от эруптивовавшей северной части волокна 1–2 появились светящиеся ленты aa и bb, подобные вспышечным. Как и в эруптивных вспышках, ленты постепенно удлинялись вдоль волокна, в основном, на юг, и заметно расходились в поперечном направлении. За 50 мин расстояние между ними увеличилось с начальных 35 до 60 тыс. км. Несмотря на большие размеры лент, их яркость была незначительной, и данное событие не классифицировалось как оптическая вспышка. Во-вторых, одновременно с развитием лент, наблюдались диффузные уярчения (стрелки на кадрах “ж”, “з”). Одно из них появилось около 00:22 северо-западнее позиции 1 и до 00:54 переместилось на юго-восток вдоль южной компоненты волокна 1–5 на ≈ 220 тыс. км со средней скоростью ≈ 145 км/с (это уярчение обнаружимо и на радиоизображениях, синтезированных авторами по данным радиогелиографа Нобеяма на частоте 17 ГГц с усреднением 1 мин, что указывает на повышенные температуры в этой области). За этим последовало усиление контраста, уширение и некоторое смещение южной компоненты волокна 1–5 на юго-запад (кадр “и”). В 00:27–00:30 UT также едва обнаружимо уярчение, перемещавшееся от позиции 3 на север/северо-восток, в сторону активной области. После 00:50 юго-восточная часть волоконной структуры начинает восстанавливаться, но ее положение смещено в картинной плоскости к юго-западу относительно предэруптивной. Наблюдения в Биг-Бэр окончились в 01:18.

Рассмотренные явления укладываются в следующую общую картину эрупции $H\alpha$ волокна. Основная начальная эрупция произошла в центральной зоне волокна 1–2, по мере подъема которой в эрупцию постепенно вовлекались северная (2–3) и южная (1–5) протяженные ветви волокна. Протяженная волоконная структура приняла вид сечения колокола с вытягивающейся верхней частью и закрепленными юго-восточным и северо-западным концами. По мере ее вытяжения часть нагретой плазмы стекла вниз, к краям структуры (большей частью к юго-восточному краю), и затем остыла.

4. ДИММИНГИ

Изображения крайнего УФ- и мягкого рентгеновского диапазонов, полученные на телескопах SOHO/EIT и Yohkoh/SXT, дают дополнительную

информацию об эрупции волокна и сопровождавших ее крупномасштабных явлениях. На рис. 2 показаны изображения, полученные в четырех каналах SOHO/EIT 304, 171, 195, 284 \AA (четыре верхних ряда) и Yohkoh/SXT (нижний ряд) в порядке возрастания температуры (сверху вниз). В левом и правом столбцах показаны соответствующие изображения без вычитания, полученные до эрупции и через ≈ 6 ч после нее. В двух средних столбцах приведены фиксированные разностные изображения вблизи максимальной фазы события (01 UT) и на поздней постэруптивной стадии (07 UT).

Разностные изображения (рис. 2, от кадров “е”–“к” к кадрам “л”–“п”) показывают развитие крупномасштабных долгоживущих диммингов (темные области, обозначенные на кадре “ж”), протяженной светящейся постэруптивной аркады и связанных с ней лент, подобных вспышечным. Как и во многих других эруптивных событиях, два димминга D1 и D2 располагаются по обе стороны аркады, т.е. волокна и линии раздела полярностей магнитного поля. Это соответствует стандартной картине: димминги D1 и D2 располагаются в основаниях эруптивовавшей жгутовой магнитной структуры, связанной с волокном. Кроме этих двух диммингов, в данном событии присутствуют еще два крупных удаленных димминга: северо-восточный D3 и северо-западный D4. Оригинальные и разностные изображения на рис. 2 показывают, что юго-восточный (D1) и северо-восточный (D3) димминги связаны между собой системой крупномасштабных петель. Многие из этих петель на разностных изображениях тоже выглядят темными, а димминги D1 и D3 расположены в полях отрицательной и положительной полярности, соответственно. Из всего этого следует, что в процессе эрупции участвовали не только магнитные структуры, располагавшиеся над волокном и упировавшиеся в димминги D1 и D2, но и крупномасштабные системы петель, соединявшие димминги D1 и D3.

Проявления диммингов и других долговременных явлений в каналах, соответствующих разным температурам, демонстрируют приведенные в двух средних колонках рис. 2 разностные изображения. Кадры “е”–“к” и “л”–“п” показывают крупномасштабные возмущения примерно через 1 ч и 7 ч после эрупции волокна, соответственно. Примыкающие к волокну димминги D1 и D2 в течение многих часов выглядят примерно одинаково в трех корональных каналах 171, 195, 284 \AA и несколько слабее проявляются в канале 304 \AA (около 01 UT, кадр “е”). Димминг D3 в этом канале едва обнаружим только на кадре около 07 UT (кадр “л”). Димминг D4 проявляется примерно одинаковым образом во всех каналах, а его очертания несколько меняются от кадра к кадру. Более полный набор

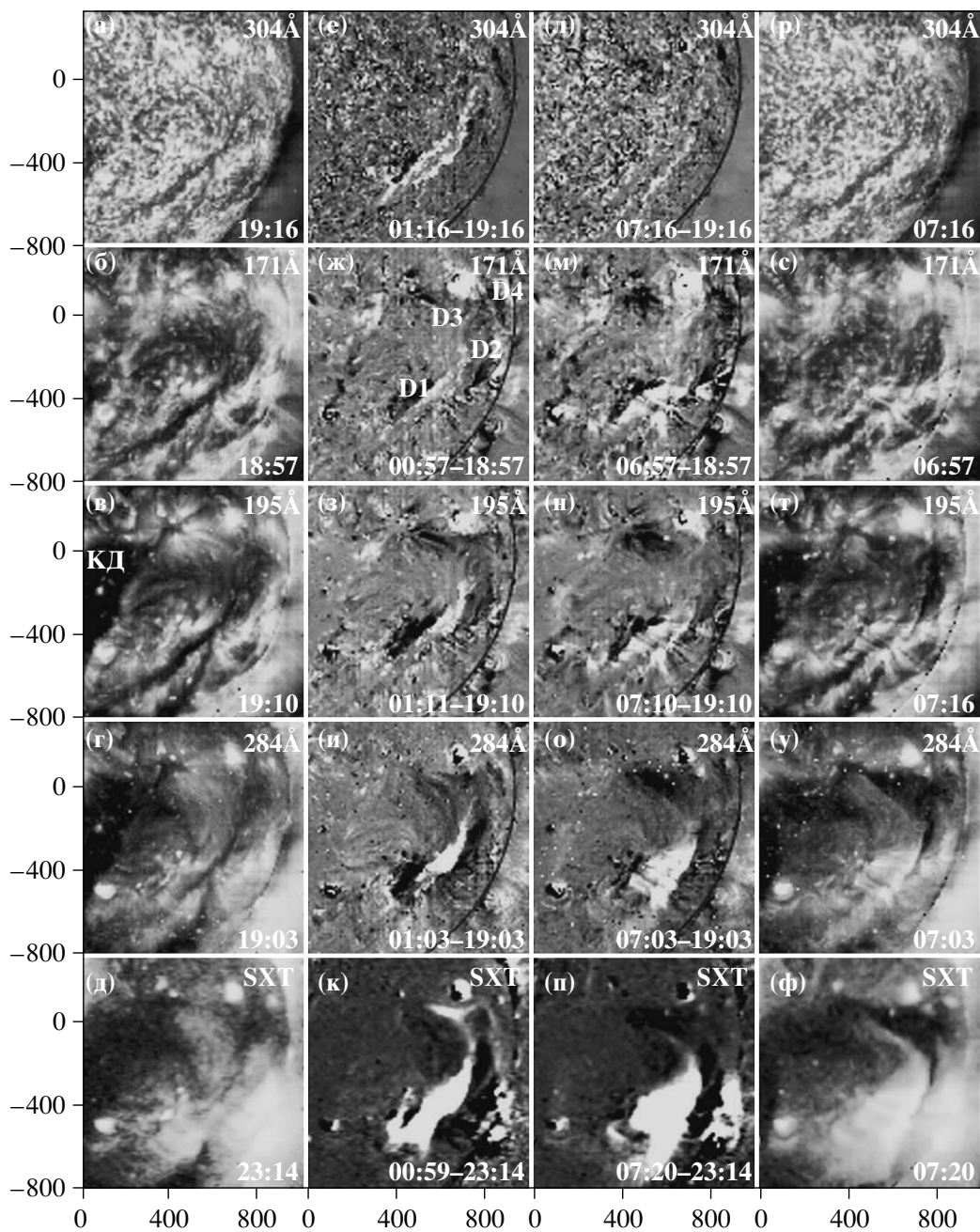


Рис. 2. Изображения в каналах SOHO/EIT 304, 171, 195, 284 Å (четыре верхних ряда) и Yohkoh/SXT (нижний ряд). В левом и правом столбцах показаны соответствующие изображения без вычитания перед эрупцией и через ≈ 6 ч после эрупции волокна. В двух средних столбцах — фиксированные разностные изображения на моменты около 01 и 07 UT.

кадров без вычитания в канале 195 Å показывает, что потемнение в этой области связано с изменяющимся северным волокном 4, видимым и в линии $H\alpha$ (рис. 1).

Изображения мягкого рентгеновского диапазона, полученные на Yohkoh/SXT (рис. 2к, 2п), в областях D1 и D2 также показывают снижения яркости, по форме близкие к наблюдаемым в линиях

крайнего УФ-диапазона. С течением времени развивающаяся постэруптивная аркада расширяется в области этих диммингов, уменьшая их площадь. Аналогичное явление наблюдается и в восточной части D1. Расширение аркады в мягком рентгеновском диапазоне опережает наблюдаемое сужение диммингов в крайнем УФ-диапазоне, что соответствует охлаждению петель в рамках стандартной картины.

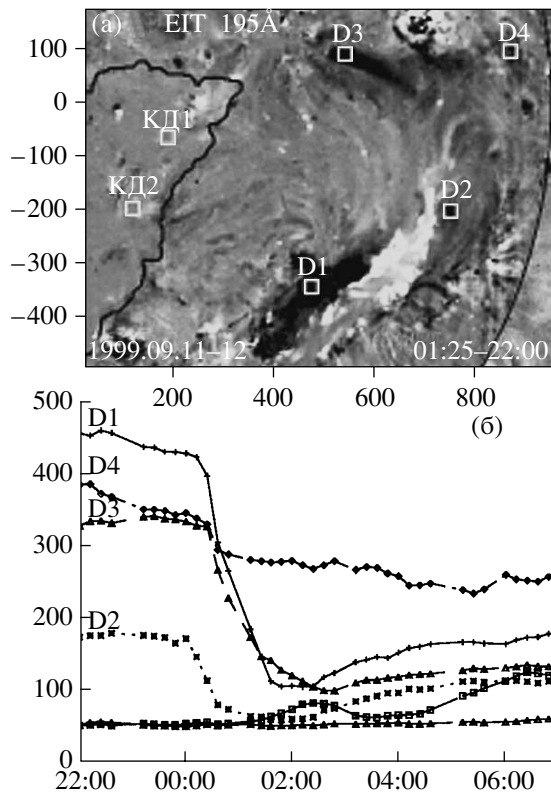


Рис. 3. Временные профили (б) диммингов D1, D2, D3 и D4 в площадках размером 10×10 пикс., обозначенных на кадре вверху (а), в канале 195 \AA . Для сравнения показаны уровни яркости в двух площадках близлежащей КД, почти неизменный в КД1, и немонотонно увеличивающийся в КД2. Темный контур соответствует границе КД.

Ситуация же в области D3 и к востоку от нее выглядит необычно. Потемнению в крайнем УФ-диапазоне соответствует поярчение в мягком рентгеновском диапазоне (рис. 2з, 2к). Его яркость невелика, но оно отчетливо видно. Высота структур, излучавших до эрупции в крайнем УФ (т.е. димминговых), и излучающих после эрупции в мягком рентгене может существенно отличаться, поэтому их пространственное совпадение может быть проекционным эффектом. Однако даже вблизи D3 ни в одном канале крайнего УФ-диапазона нет заметных поярчений. Следовательно, явление, наблюдаемое в области D3, можно объяснить только нагревом плазмы выше 2.5 MK , в результате чего ее излучение выходит из области температурной чувствительности всех каналов EIT, но становится видимым в мягком рентгеновском диапазоне.

С 00:58:56 до 01:43:44 в наблюдениях Yohkoh/SXT был перерыв. После перерыва на его изображениях в области D3 и восточнее поярчения уже не наблюдается, а D3, D4 и D2 сливаются в одну темную область, медленно расширяющуюся

к северу до 04 UT 12 сентября. В мягком рентгеновском диапазоне она выглядит как корональная дыра (КД), и последующих изменений в ней не наблюдается. Наш анализ данных Yohkoh/SXT оканчивается 12 сентября в 10:11. Отметим, что, как минимум, часть площади этой будущей дыры до события была занята излучающими в мягком рентгеновском диапазоне петлями (рис. 2д). Как указывалось, в корональных каналах EIT столь большой дыры не наблюдается; существенно меньшие по площади димминги D2, D3 и D4, разделенные излучающими структурами, продолжают существовать, по крайней мере, до 07 UT 12 сентября. Факт сосуществования диммингов как в крайнем УФ-, так и в рентгеновском диапазоне уже не объясним температурными изменениями. Следовательно, в интервале 00:59–01:44 началось снижение концентрации плазмы в этих областях, по-видимому, вследствие ее истечения в раскрывшихся корональных структурах.

Информация о степени понижения яркости (глубине) диммингов в канале 195 \AA и их эволюции представлена на рис. 3. Временные профили яркости в разных местах каждого димминга не идентичны; здесь показаны типичные временные профили в четырех обозначенных на кадре “а” площадках размером 10×10 пикс. в диммингах D1–D4 и в двух местах центральной части КД, примыкающей к восточной границе области эрупции. Временные профили в диммингах D1, D2 и D3 в целом однотипны. Западный димминг D2 начал развиваться раньше остальных, в интервале 23:57–00:09, еще на стадии медленного смещения волокна. Снижение яркости в восточном (D1) и северо-восточном (D3) диммингах резко началось между 00:09 и 00:21, примерно совпадая с началом фазы быстрой эрупции волокна. В некоторых местах, в частности, в димминге D1, медленное понижение яркости происходило еще на пред-эруптивной фазе, начиная с $\approx 22:33$ 11 сентября. Время снижения яркости в диммингах D1–D3 составляет 1–2 ч. Снижение яркости в диммингах не доходит до уровня восточной КД, в центральной части которой (площадка КД1) низкая яркость практически не меняется в течение исследуемого временного интервала. Яркость в области дыры, отмеченной КД2, немонотонно растет со временем. Это явление обсуждается в разделе 6. Максимальная относительная глубина димминга D1 достигает 75%, диммингов D2 и D3 – 60%–65%. Как показывают измерения около 01 UT, глубина диммингов D1 и D2 в каналах 304, 171, 284 \AA тоже значительна – 50%–70%. Характер изменений яркости в вызванном поглощением димминге D4, определяемых движениями волокна,

отличен от диммингов D1–D3, а его глубина не превышает 35%.

5. ЯВЛЕНИЯ ВДОЛЬ ГЛАВНОЙ НЕЙТРАЛЬНОЙ ЛИНИИ

В отличие от эруптивных вспышек в активных областях, где главная нейтральная линия обычно четко прослеживается, хаотическая картина перемежающихся мелкомасштабных слабых полей разной полярности в данном случае затрудняет выявление главной нейтральной линии. Тем не менее, ее ход можно проследить несколькими способами. Во-первых, все 15 магнитограмм полного диска, полученных на SOHO/MDI за полные сутки наблюдений, были приведены к одному моменту времени с помощью компенсации солнечного вращения и затем были усреднены. Это было сделано как для 11, так и для 12 сентября. Затем усредненные магнитограммы были подвергнуты глубокому сглаживанию. Это подавляет флуктуации и быстрые изменения магнитных полей, позволяя понять примерный ход главной нейтральной линии. Вторых, рассчитанные по программе В.Н. Обридко и др. карты магнитного поля на 23:20 11 сентября, экстраполированные в потенциальном приближении по синоптическим стэнфордским картам на высоты $(0.1–0.2)R_{\odot}$, показывают близкий результат. В-третьих, результаты, полученные обоими способами, соответствуют расположению $H\alpha$ волокна и его элементов вдоль линии 1–2–3 (рис. 1а) и их продолжению на юго-восток.

Как отмечалось, на поздней постэруптивной фазе глубина и площадь диммингов постепенно уменьшаются (рис. 2, 3; особенно, D1 и D2), в частности, за счет того, что одновременно с диммингами вдоль главной нейтральной линии развивается увеличивающаяся по длине и ширине светящаяся постэруптивная аркада с ярко выраженными лентами, подобными вспышечным. В канале 195 Å небольшие по протяженности ленты появляются в 00:21 по бокам от эруптировавшего волокна 1–2 (рис. 4б). Они аналогичны лентам, видимым в это же время в линии $H\alpha$ (рис. 1ж). Расстояние между ними на этот момент составляет 43 тыс. км. Затем в корональных каналах наблюдается развитие аркады с петлями, опирающимися в узлы лент. Со временем протяженность аркады и лент в северном и южном направлениях увеличивается, и происходит раздвижение лент (возрастает поперечный размер аркады). Это соответствует формированию все более высоких петель на постэруптивной стадии. Ленты наиболее четко проявляются в канале 304 Å (рис. 2е, 2л). Здесь на момент 01:16 протяженность лент с севера на юг достигает ≈ 525 тыс. км, т.е. $0.75R_{\odot}$; к 07:19 максимальное расстояние между

лентами возрастает до ≈ 140 тыс. км, т.е. $0.2R_{\odot}$. Яркая аркада выражена в центральной области, вокруг позиций 1–2, где магнитные поля на фотосфере достигали несколько сотен гаусс. С удалением от этой области магнитные поля не превышают 100 Гс и перемежаются с полями противоположной полярности. К северо-западу расстояние между лентами уменьшается до их видимого схождения. В данном событии ленты шире, чем во вспышках, и они обладают тонкой структурой, что определяется магнитными полями на фотосфере. Заметим, что эти особенности типичны для эрупций волокон вне активных областей.

По данным Yohkoh/SXT (рис. 2к, 2п, 2ф), аркада в мягком рентгеновском диапазоне имела примерно такой же характер и параметры, как и в корональных каналах EIT 195 и 284 Å (рис. 2з, 2н, 2т и рис. 2и, 2о, 2у). Несмотря на значительные размеры и кажущуюся существенную яркость постэруптивной аркады как в крайнем УФ-, так и в мягком рентгеновском диапазонах, ее вклад в общий поток солнечного излучения был незначительным: по измерениям на рентгеновских мониторах спутников GOES поток излучения аркады в области 1–8 Å оставался на уровне, близком к фону, и не превышал $B5$, т.е. 5×10^{-7} Вт/м².

Еще одно явление, обнаружимое на изображениях EIT 195 Å без вычитания вдоль главной нейтральной линии — узкое протяженное поярчание, распространяющееся от области 1–2 к северу в 00:21–00:33 и к юго-востоку в 00:33–01:11 (на рис. 4б–4г оно еле заметно). Юго-восточная компонента имеет волокнистую структуру. Соответствующее поярчание наблюдается и в мягком рентгеновском диапазоне, причем его юго-восточная компонента располагается под формирующимися вспышечными петлями. Время и место появления этих поярчаний и направления их распространения согласуются с аналогичными явлениями, наблюдаемыми в линии $H\alpha$ в главной фазе эрупции, связанными с нагревом плазмы и растеканием ее от центра эрупции (область 1–2) вдоль оси волокна. Скорее всего, это уярчение приподнимающихся частей волокна, оставшихся после эрупции у солнечной поверхности. Подобные явления нередко наблюдаются на фильмах TRACE. Волокно становится ярким в канале 195 Å только при его нагреве, а распространение области поярчания может быть связано как с движением области нагрева (волнового характера), так и с течением плазмы вдоль волокна.

6. РАСПРОСТРАНЯЮЩЕЕСЯ КРОНАЛЬНОЕ ВОЗМУЩЕНИЕ И КВМ

Возмущениям, вызванным эрупцией, подвергаются не только непосредственно участвовавшие

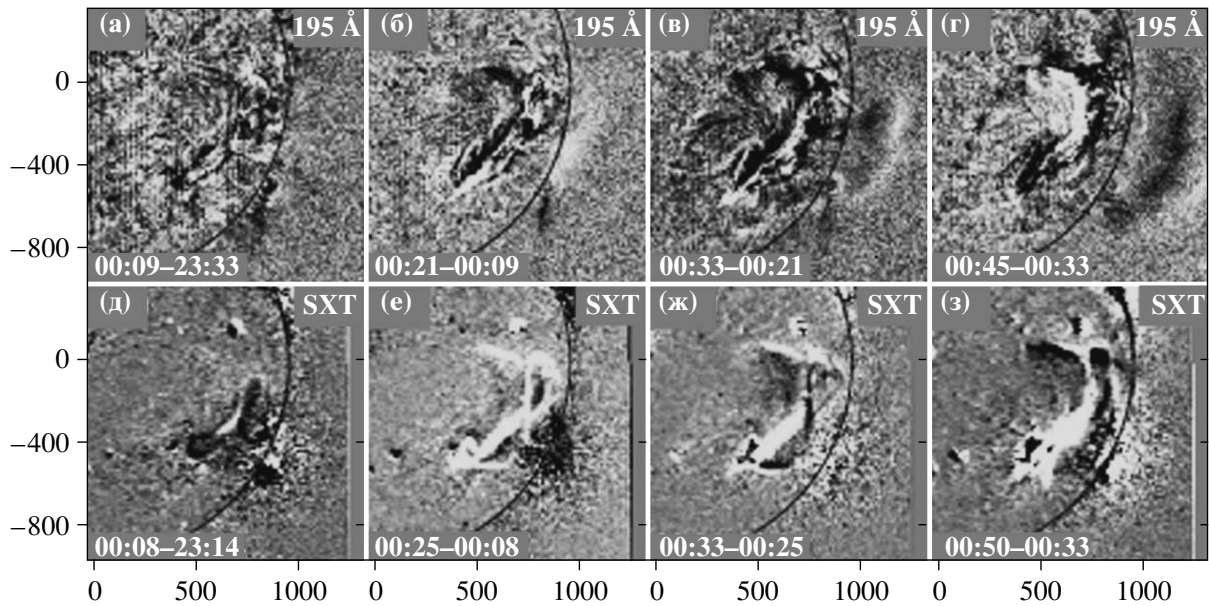


Рис. 4. Последовательные разностные изображения SOHO/EIT в канале 195 \AA (а–г) и в мягком рентгеновском диапазоне по данным Yohkoh/SXT (д–з), иллюстрирующие корональное возмущение (“волну EIT”), квазистационарное на диске и распространяющееся над лимбом.

в ней структуры. Корональные возмущения могут распространяться во все стороны на значительные расстояния. Их можно проследить по изменениям яркости на изображениях крайнего УФ- и других диапазонов излучения. Помимо явлений понижения яркости, имеют место и крупномасштабные слабые поярчения, получившие общее название “волн EIT”. Они наблюдаются не только во вспышечных эруптивных событиях, но также и при некоторых эрупциях волокон вне активных областей [12, 44]. В анализируемом событии подобное возмущение обнаружено на разностных изображениях EIT в канале 195 \AA . Благоприятное расположение центра эрупции в районе S20 W45 позволило наблюдать его как на диске, так и над лимбом. На рис. 4 представлены относительные последовательные разностные изображения EIT (последовательные разности, деленные на изображение до события в 23:33) и последовательные разностные изображения Yohkoh/SXT. Все изображения подвергнуты нелинейной обработке для выявления коронального возмущения очень низкой яркости.

Очень слабое овальное поярчение обнаружимо на кадре “б” (12 сентября, 00:21). В его восточной части фрагментарные уярчения располагаются примерно по западной границе близлежащей КД, куда упираются также темные димминговые петли (т.е. петли с понижающейся яркостью), исходящие из окрестности эруптирующего волокна (димминга D1). В южной части овала фрагменты возмуще-

ния отождествляются с фронтом уярчения, которое аналогично уярчению в линии $\text{H}\alpha$ (см. раздел 3) и распространяется на этой стадии в юго-восточном направлении вдоль южной части волокна. Северный сектор возмущения примерно совпадает с северной оконечностью предэруптивного волокна и областью развития северной части димминга D3. Западный же сектор возмущения имеет вид дуги, поднявшейся над лимбом до высоты 70 тыс. км в картинной плоскости. На последующих изображениях положения южного, восточного и северного секторов коронального возмущения изменяются незначительно. В восточной части южного сектора, в районе южной оконечности волокна, возмущение несколько сместилось (на 40 тыс. км) в соответствии с продолжающимся распространением юго-восточного уярчения. Положение восточного сектора вблизи западной границы КД почти не меняется, как это часто наблюдается во вспышечных событиях [3, 45]. В то же время западная дуга над лимбом вместе с ее южным продолжением на диске, заметном на кадре в 00:33, быстро расширяется. К 00:45 (кадр “г”) высота западной дуги достигает 330 тыс. км. Результаты анализа кинематики и свойств этой структуры в сопоставлении с кинематикой и структурой КВМ приведены ниже.

Корональное возмущение проявилось и в мягком рентгеновском излучении, как показывают изображения Yohkoh/SXT (рис. 4д–4з). Восточная (на диске) и западная (у лимба) компоненты возмущения имеют диффузный характер. Восточная

компонента, как и в канале EIT 195 Å, ограничена все той же западной границей близлежащей КД, а западная компонента выглядит как общее обширное бесструктурное уярчение над лимбом. Северное уярчение, рассмотренное в разделе 4, медленно смещается на север, в сторону активной области, не достигая ее. Удлинение на юго-восток аналогично движущемуся поярчанию в каналах H α и 195 Å. Эрупция же крупномасштабной горячей структуры отчетливо прослеживается на кадрах “д”, “е”, “ж”.

Рассмотренная эрупция привела к образованию КВМ, видимого на фиксированных разностных изображениях коронографа LASCO/C2, полученных в белом свете (рис. 5а, 5б). КВМ имел фронтальную структуру в виде большой структурированной петли, охватывающей диапазон позиционных углов от 220° на юге до 320° на севере. Расположение центральной части волокна 1-2 и направление эрупции его фрагментов в линии H α (рис. 1) и в канале EIT 195 Å (рис. 2 и 4) близки к положению южной “ноги” петлеобразного КВМ. Выделяются две яркие компоненты КВМ, фронтальная часть которых соединена с внутренней структурой КВМ тонкими слабо светящимися радиальными элементами. Близость позиционных углов и общий характер наблюдаемых структур дают основание предполагать, что эруптирующие фрагменты волокна отождествляются с этими двумя компонентами южной “ноги” КВМ. По-видимому, центральная и северная составляющие фронта КВМ соответствуют эруптировавшим крупномасштабным петлям, связывавшим, в частности, димминги D1 и D2, а также D1 и D3 (см., например, рис. 2з, 2и и рис. 4е).

Что же представляет собой расширявшаяся над западным лимбом дуга коронального возмущения, наблюдавшаяся в канале 195 Å (рис. 4а–4г), и как она связана с фронтальной петлей КВМ? На рис. 5с помещены рядом в соответствующем масштабе наиболее четкое изображение этой дуги в 00:33 и первое изображение КВМ в 01:29. Несмотря на почти часовую разницу во времени, разительным является соответствие дуги “волны EIT” и фронтальной петли КВМ по положению и сходство их формы и деталей структуры. В частности, в центральной зоне как дуги, так и петли выделяется яркий элемент треугольной формы, а к югу от него скачкообразно уменьшается ширина обеих структур. В отличие от петли КВМ, северная часть дуги в канале 195 Å не обнаружима, по-видимому, из-за существенного отличия ее температуры от диапазона чувствительности этого канала EIT. Подобие двух этих структур демонстрирует наложение их изображений, приведенных к одному масштабу (рис. 5г; масштабный коэффициент находится из

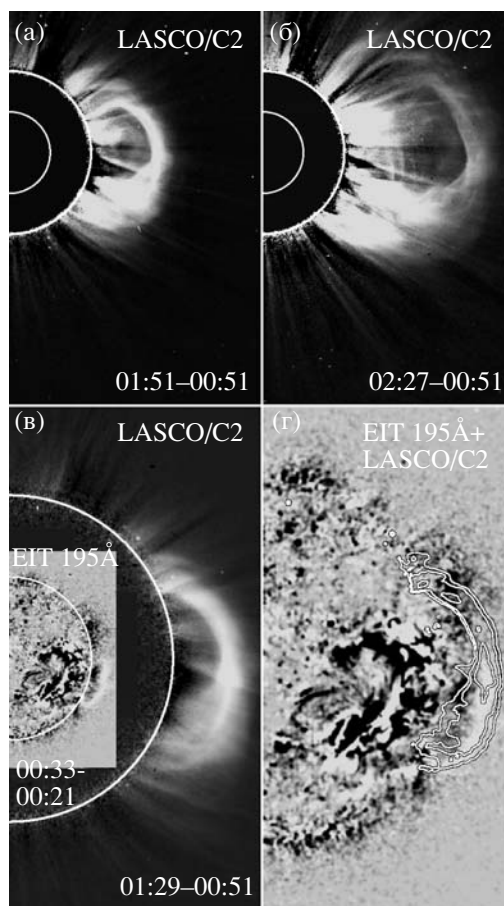


Рис. 5. (а, б) — Фиксированные разностные изображения КВМ по данным SOHO/LASCO/C2. (в, г) — Разностные изображения EIT в канале 195 Å и LASCO/C2 в едином масштабе, а также наложение контура фронтальной структуры КВМ и изображения поднимающейся УФ-дуги, демонстрирующие, что это один и тот же объект расширяющийся автомодельно.

рис. 6а). Это совпадение при различии размеров этих структур и значительной разнице во времени дает основание для двух важных выводов. Во-первых, наблюдавшаяся над лимбом в крайнем УФ-диапазоне дуга и фронтальная структура КВМ идентичны. Во-вторых, движение этого единого объекта является автомодельным, т.е. он остается подобным самому себе при своем расширении со временем.

Эти выводы подтверждаются кинематическим анализом, подобным примененному в [12]. Для измерений в нашем событии из геометрического центра расширяющейся дуги проведены подобные друг другу овалы через видимые в канале 195 Å части “волны EIT”. На позиционном угле около 270°, примерно вдоль радиальной оси “волны EIT” и фронта КВМ, измерены расстояния от центра солнечного диска до построенных ова-

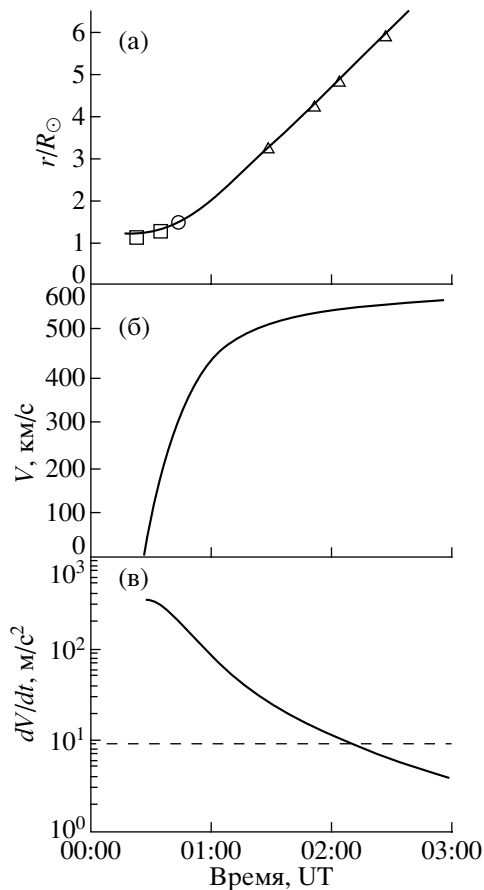


Рис. 6. (а) — Расстояние от центра диска r/R_{\odot} поднимающейся дуги на трех фильтрограммах EIT в канале 195 \AA (квадратики и кружок), положение фронта КВМ на четырех изображениях LASCO/C2 (треугольники) и расчетный график автомодельного расширения КВМ. (б, в) — графики расчетных скорости V и ускорения dV/dt .

лов, представленные на рис. 6а. Эти расстояния соответствуют наблюдаемым положениям переднего края “волны EIT” в картинной плоскости на кадрах 00:21 и 00:33 (квадратики на рис. 6а), а для момента 00:45, когда передний край дуги вышел из поля зрения, расстояние оценено по описанной методике с использованием боковых частей дуги (кружок на рис. 6а). Треугольниками представлены положения фронта КВМ на четырех изображениях LASCO/C2 по данным известного каталога КВМ SOHO LASCO CME Catalog (http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/). Через все точки проведена расчетная кривая автомодельного расширения КВМ [12], полученная при следующих параметрах: начальная скорость — 0.1 км/с , время начала автомодельного расширения — 00:19:00, начальный размер расширяющейся структуры — 500 тыс. км . Асимптотическая скорость фронта КВМ (на большом удалении от Солн-

ца) — 595 км/с (рис. 6б), что несколько ниже значения, оцененного в каталоге КВМ в результате линейной аппроксимации данных LASCO (732 км/с). Последняя скорость определялась в каталоге КВМ на несколько других позиционных углах по самой быстрой детали КВМ на его переднем крае. Найденные параметры находятся в хорошем соответствии с наблюдениями. Начальный размер автомодельного расширения — 500 тыс. км — близок к наблюдаемому масштабу эрупции, характеризующему, например, протяженностью вспышечно-подобных лент, видимых в канале EIT 304 \AA на рис. 2е [12]. Начало автомодельного расширения (00:19:00) близко к первым проявлениям крупномасштабного коронального возмущения на кадрах EIT и Yohkoh/SXT (рис. 4). Напомним, что медленный подъем структур до эрупции (с малым или нулевым ускорением) не является автомодельным и соответствующим решением не описывается. Кроме того, это время существенно реалистичнее, чем экстраполированное время начала КВМ, оцененное в каталоге КВМ в результате полиномиальной аппроксимации (не ранее 00:48).

На рис. 6б, 6в показаны соответствующие графики скорости и ускорения КВМ, полученные дифференцированием расчетной кривой, приведенной на рис. 6а. Отметим, что, при полном соответствии этой расчетной кривой экспериментальным точкам, характер изменения скорости кардинально отличен от параболы, предполагаемой при аппроксимации полиномом 2-го порядка, а ускорение КВМ, составляющее вначале около 350 м/с^2 , на представленном интервале в 3 ч уменьшается на 2 порядка. Для сравнения штриховой линией обозначено ускорение, приведенное в каталоге КВМ (9.2 м/с^2).

Еще одно интересное явление наблюдалось в западной части упоминавшейся КД. Лучшее всего оно видно на контрастированных изображениях EIT 195 \AA без вычитания (рис. 2в–2д и 2т–2ф). Примерно посередине между наибольшей яркой корональной точкой в центре КД и западной границей КД располагаются восточные основания длинных петель, уходящих в область эрупции. В 00:45 эти основания заметно уярчаются, а ряд последующих кадров (до 02 UT) показывает, как идущие от них первоначально под малым углом к поверхности петли “разгибаются”, так что их “ноги” становятся почти вертикальными, т.е. происходит радиализация магнитного поля. Еще позже, начиная с 03:33, к северу от этой области появляется ряд низких замкнутых петель, хорошо видимых начиная с 05:33 (рис. 2н). Эти явления отражаются изменениями яркости в области KD2 на рис. 3б.

7. ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Событие 12.09.1999 демонстрирует, что крупномасштабные возмущения, сопровождающие эрупции волокон вне АО, не менее значительны, чем во вспышечных событиях. Сопровождающие эрупцию волокна явления во многом подобны аналогичным явлениям, наблюдаемым во вспышках. Хотя эрупция волокон происходит в относительно слабых магнитных полях, здесь, по-видимому, имеют место те же эруптивные и постэруптивные процессы, что и при КВМ, связанных со вспышками в АО, что определяет их общие черты. Однако есть и различия между теми и другими, обусловленные прежде всего характером и величиной магнитных полей на фотосфере под областью эрупции. В событиях вне АО магнитные поля слабы, и на небольших масштабах разные полярности чередуются хаотическим образом.

В начале суток 12 сентября, после медленного предэруптивного подъема, произошло вытяжение с быстро нарастающей скоростью длинной волоконной структуры в виде гауссианы с элементом волокна 1-2 в ее вершине. Явления в центральной части области, вовлеченной в эрупцию, выглядят в целом согласующимися со “стандартной моделью вспышки” (“CSHKP”) и известными представлениями на основе выводов из наблюдений других эруптивных событий. Магнитные поля на фотосфере в этой области были достаточно сильны, до нескольких сотен гаусс, и это определило расположение здесь наиболее ярких участков лент.

Вытяжение (“раскрытие”) охватывавших сверху длинную волоконную структуру поперечных петель сопровождалось магнитным пересоединением под удаляющимся волокном в соответствии со “стандартной моделью”. Результатом энерговыделения стал и значительный нагрев в этой области (>2.5 МК согласно данным Yohkoh/SXT). При раскрытии внешних петель концентрация плазмы в них существенно снизилась, в результате чего образовались димминги D1 и D2 по бокам аркады. Яркость в них снизилась и в крайнем УФ-, и в мягком рентгеновском диапазонах; следовательно, это было вызвано именно истечением плазмы, а не температурными эффектами [3, 6, 11]. Заметим, что измеренное снижение меры эмиссии на 75% соответствует двукратному снижению концентрации плазмы.

При вытяжении длинной магнитной структуры — $H\alpha$ -волокна и связанных с ним более горячих структур — можно ожидать и появления диммингов у ее концов (заметим, что D1 и D2 занимают промежуточное положение между боками и концами аркады). Однако в данном событии (как и во многих других) наблюдалось растекание остывающей плазмы из центральной разогретой области хребта аркады к краям вытянувшейся эруптивной

магнитной структуры, как показывают данные $H\alpha$, крайнего УФ- и рентгеновского диапазонов. Одновременное проявление течений во всех этих диапазонах свидетельствует о широком интервале значений температур растекающейся плазмы — от 10^4 К до >2.5 МК. Явственно наблюдавшиеся в данном событии течения вдоль оставшихся у солнечной поверхности частей волокна отличают эту ситуацию от фазового перемещения уярчений вследствие движения области энерговыделения при последовательном пересоединении магнитного поля под вовлекаемыми в эрупцию частями волокна [36].

Помимо этих течений, можно предполагать и “соскальзывание” петель, которые охватывали длинную волоконную структуру до эрупции вблизи ее концов. При вытяжении эруптирующей структуры петли должны “соскальзывать” ближе к ее концам. В результате средняя концентрация плазмы в областях этих концов должна возрасти и вызвать поярчение, действительно наблюдавшееся вокруг юго-восточной оконечности волоконной структуры, где течение плазмы было наиболее заметным. Напомним, что подобные поярчения крайнего УФ-излучения, например, в канале 195 Å, свидетельствуют о повышении концентрации плазмы с нормальной корональной температурой, а не о повышении температуры.

Димминг D4, как указывалось, был обусловлен поглощением в активном волокне; подобные явления наблюдались и ранее [13]. Явления же в области димминга D3 свидетельствуют об иной картине. Несколько смещавшееся к северу поярчение мягкого рентгеновского излучения (рис. 4е, 4ж, 4з) показывает поджатие магнитных структур с юга в результате эрупции. При этом произошел их разогрев до температур выше 2.5 МК. Конкретный механизм нагрева неясен. Затем произошла эвакуация плазмы из этой области, как и из областей диммингов D1 и D2, и картины, наблюдаемые в крайнем УФ- и рентгеновском диапазонах, пришли в соответствие друг с другом (рис. 2н, 2о, 2п). Температурные изменения при формировании некоторых диммингов отмечались и ранее в спектральных наблюдениях [46].

Эрупция структур между областями D1 и D2 непосредственно демонстрируется различными наблюдениями, но и на продолжении длинной дуги до D3 эрупция явно имела место. На это указывают и появление димминга D3, и наличие северной ветви КВМ, и наблюдавшиеся в мягком рентгеновском диапазоне явления (рис. 4е, 4ж). Однако если в области между D1 и D2 было выброшено и волокно, и расположенные над ним структуры, то в области к северу от D2 и, по-видимому, далее к D3 высокие (и более горячие) структуры эруптировали, а более низкие (и, вероятно, само волокно)

остались у поверхности Солнца, по крайней мере, на первом этапе. При этом неясно, эруптировала ли протяженная магнитная структура от D1 до D3 как целое, или же первичная эрупция между D1 и D2 повлекла за собой последующую эрупцию, вплоть до D3. В пользу первой возможности свидетельствуют единая структура КВМ со сходными южной и северной ветвями, практически одновременное начало снижения яркости в диммингах D1 и D3, и форма расширяющегося выброса на разностных изображениях *Yohkoh/SXT* в 00:16–00:33 (рис. 4е, 4ж). В таком случае наличие димминга D2 и тот факт, что его развитие опережало прочие димминги, напоминает ситуацию при объединении волокон в двухсегментной модели инициации КВМ [47].

Как и в случае вспышки, наблюдалось формирование постэруптивной аркады и протяженных лент, подобных вспышечным, в ее основаниях. Ленты были шире вспышечных и структурированы они были соответственно магнитным полям на фотосфере; это определяет и вид петель над ними. Продвигаясь вдоль главной нейтральной линии в область более слабых полей, мы видим менее яркие ленты и петли. Поперечные размеры аркады через несколько часов после эрупции достигли 140 тыс. км, максимальная протяженность лент — 520 тыс. км. Несмотря на их значительные размеры и заметную яркость, общий поток их излучения был намного ниже наблюдаемых при эрупциях в АО, для которых характерны аркады и ленты гораздо меньших размеров, но значительно большей яркости [33, 48]. В событиях обоих типов наблюдаются первичные тепловые процессы в короне, но при эрупциях вне АО нет видимых проявлений ускоренных частиц, определяющих мощные процессы, характерные для импульсной фазы вспышек. В этом отношении эрупции волокон вне АО, включая рассматриваемое событие, отличаются от вспышечных эрупций, происходящих в сильных магнитных полях АО.

Данные наблюдений и результаты их кинематического анализа обосновывают следующую интерпретацию “волны EIT” в этом событии. Западная дуга “волны EIT” над лимбом (и ее южное продолжение на солнечном диске) определенно является фронтальной структурой КВМ на ранней стадии его автомодельного расширения. По-видимому, это типично для эрупций волокон вне АО, поскольку при длительном плавном разгоне выброса от начальных малых скоростей образование ударных волн маловероятно, и расширяющийся над лимбом объект может быть только вытягивающейся магнитной структурой. Напротив, при достаточно мощных вспышках распространяющиеся корональные возмущения могут быть проявлениями взрывной ударной волны [13, 28, 30].

Квазистационарные восточный и северный секторы овала на диске в области западной границы КД и на севере, вблизи границ других магнитных доменов (сепаратрис), связанных с расположенной севернее активной областью, возможно, обозначают контуры корональных структур, связанных с “основанием” расширяющегося КВМ. Причина поярчения в крайнем УФ-диапазоне — увеличение средней концентрации плазмы при сжатии корональных структур. В простейшей схеме распространяющееся корональное возмущение останавливается на границе КД, магнитное поле в которой предполагается радиальным; распространению возмущения препятствуют и границы раздела магнитных доменов [3, 45]. В общих чертах эта схема подтверждается, но наблюдения показывают более сложную картину. Магнитное поле в КД существенно неоднородно; более того, до эрупции присутствуют длинные петли, входящие под малыми углами в зону КД. В ходе события эти петли трансформируются, поле в их частях, входящих в КД, радиализуется, а затем в этой области КД образуются замкнутые низкие петли, что в итоге приводит к исчезновению этой части КД (ср. рис. 2в, 2г, 2д и рис. 2т, 2у, 2ф). В этой связи уместно вспомнить событие, связанное с эрупцией волокна в КД [49].

Расширение эруптировавших структур, видимых вблизи солнечной поверхности, и КВМ, наблюдаемого коронографом *LASCO/C2*, автомодельно, т.е. они остаются подобными самим себе. Автомодельное расширение представляет более адекватное приближение для описания кинематики выброса, чем используемая в настоящее время полиномиальная аппроксимация, основанная на предположении постоянства ускорения или его отсутствия. Существенно, что начальное расширение КВМ характеризуется значительным ускорением, быстро уменьшающимся со временем. В этом причина некорректности выводов, сделанных на основе дезориентирующей полиномиальной аппроксимации, и выявленных в ряде исследований несоответствий, например, между моментом эрупции и началом КВМ.

Авторы благодарны коллективам *SOHO/EIT*, *SOHO/LASCO*, *Yohkoh/SXT* за данные, использованные при анализе (*SOHO* — проект международного сотрудничества Европейского космического агентства и НАСА. *Yohkoh* — миссия ряда институтов Японии, США и Великобритании). Авторы признательны В. Юрчишину за предоставленные $H\alpha$ -фильтрограммы обсерватории Биг-Бэр. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 06-02-16106, 07-02-00101, 09-02-00115, 09-02-00544) и Министерства образования и науки РФ (грант НШ-4573.2008.2), а также программ

фундаментальных исследований РАН “Плазменная гелиофизика” и “Солнечная активность и физические процессы в системе Солнце-Земля”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Coronal Mass Ejections*, eds H. Kunow, N. U. Crooker, J. A. Linker, et al., Space Sciences Series of ISSI **21** (2006); reprinted from Space Sci. Rev. **123** (2006).
2. Б. П. Филиппов, *Эруптивные процессы на Солнце* (М: Физматлит, 2007).
3. B. J. Thompson, S. P. Plunkett, J. B. Gurman, *et al.*, Geophys. Res. Lett. **25**, 2465 (1998).
4. D. F. Webb, J. Atmosph. and Solar-Terr. Phys. **62**, 1415 (2000).
5. H. S. Hudson and E. W. Cliver, J. Geophys. Res. **106**, 25199 (2001).
6. И. М. Черток, В. В. Гречнев, Астрон. журн. **80**, 162 (2003).
7. I. M. Chertok and V. V. Grechnev, Solar Phys. **229**, 95 (2005).
8. Y. Zhang, J. Wang, G. Attrill, *et al.*, Solar Phys. **241**, 329 (2007).
9. A. A. Reinard and D. A. Biesecker, Astrophys. J. **674**, 576 (2008).
10. L. K. Harra, A. C. Sterling, Astrophys. J. (Letters) **561**, L215 (2001).
11. L. K. Harra, H. Hara, S. Imada, *et al.*, Publ. Astron. Soc. Japan, **59**, S801 (2007).
12. A. M. Uralov, V. V. Grechnev, and H. S. Hudson, J. Geophys. Res. **110**, A05104, doi:10.1029/2004JA010951 (2005).
13. V. V. Grechnev, A. M. Uralov, V. A. Slemzin, *et al.*, Solar Phys. **253**, 263 (2008).
14. G. E. Moreton and H. E. Ramsey, Publ. Astron. Soc. Pacif. **72**, 357 (1960).
15. H. R. Gilbert, T. E. Holzer, B. J. Thompson, and J. T. Burkepile, Astrophys. J. **607**, 540 (2004).
16. C. Delannée and G. Aulanier, Solar Phys. **190**, 107 (1999).
17. A. Klassen, H. Aurass, G. Mann, *et al.*, Astron. and Astrophys. **141**, 357 (2000).
18. D. A. Biesecker, D. C. Myers, B. J. Thompson, *et al.*, Astrophys. J. **569**, 1009 (2002).
19. J. I. Khan and H. Aurass, Astron. and Astrophys. **383**, 1018 (2002).
20. I. M. Chertok, V. V. Grechnev, H. S. Hudson, and N. V. Nitta, J. Geophys. Res. **109**, A02112, doi:10.1029/2003JA010182 (2004).
21. A. Warmuth, B. Vršnak, J. Magdalenic, *et al.*, Astron. and Astrophys. **418**, 1101 (2004).
22. V. V. Grechnev, I. M. Chertok, V. A. Slemzin, *et al.*, J. Geophys. Res. **110**, A09S07 (2005).
23. И. М. Черток, В. В. Гречнев, Астрон. журн. **82**, 180 (2005).
24. M. J. Wills-Davey, C. E. DeForest, and J. O. Stenflo, Astrophys. J. **664**, 556 (2007).
25. C. Delannée, J.-F. Hochedez, and G. Aulanier, Astron. and Astrophys. **465**, 603 (2007).
26. C. Delannée, T. Török, G. Aulanier, *et al.*, Solar Phys. **247**, 123 (2008).
27. G. D. R. Attrill, L. K. Harra, L. van Driel-Gesztelyi, and P. Démoulin, Astrophys. J. (Letters) **656**, L101 (2007).
28. A. Warmuth, B. Vršnak, J. Magdalenic, *et al.*, Astron. and Astrophys. **418**, 1117 (2004).
29. K. P. Dere, G. E. Brueckner, R. A. Howard, *et al.*, Solar Phys. **175**, 601 (1997).
30. V. V. Grechnev, A. M. Uralov, V. G. Zandanov, *et al.*, Publ. Astron. Soc. Japan, **58**, 69 (2006).
31. A. N. Zhukov and F. Auchère, Astron. and Astrophys. **427**, 705 (2004).
32. P. F. Chen, C. Fang, and K. Shibata, Astrophys. J. **622**, 1202 (2005).
33. Z. Švestka, Space Sci. Rev. **95**, 135 (2001).
34. A. C. Sterling and R. L. Moore, Astrophys. J. **602**, 1024 (2004).
35. A. C. Sterling and R. L. Moore, Astrophys. J. **613**, 1221 (2004).
36. D. Tripathi, H. Isobe, and H. E. Mason, Astron. and Astrophys. **453**, 1111 (2006).
37. Y.-Ch. Jiang, L.-P. Li and L.-H. Yang, Chinese J. Astron. and Astrophys. **6**, 345 (2006).
38. Y. Jiang, L. Yang, K. Li, and Y. Shen, Astrophys. J. (Letters) **667**, L105 (2007).
39. A. C. Sterling, L. K. Harra, and R. L. Moore, Astrophys. J. **669**, 1359 (2007).
40. J. Zhang, I. G. Richardson, D. F. Webb, *et al.*, J. Geophys. Res. **112**, A10102 (2007).
41. J.-P. Delaboudinière, G. E. Artzner, J. Brunaud, *et al.*, Solar Phys. **162**, 291 (1995).
42. S. Tsuneta, L. Acton, M. Bruner, *et al.*, Solar Phys. **136**, 37 (1991).
43. G. E. Brueckner, R. A. Howard, M. J. Koomen, *et al.*, Solar Phys. **162**, 357 (1995).
44. D. Tripathi and N.-E. Raouafi, Astron. and Astrophys. **473**, 951 (2007).
45. И. М. Черток, Астрон. журн. **83**, 76 (2006).
46. T. A. Howard and R. A. Harrison, Solar Phys. **219**, 315 (2004).
47. A. M. Uralov, S. V. Lesovoi, V. G. Zandanov, and V. V. Grechnev, Solar Phys. **208**, 69 (2002).
48. A. J. Hundhausen, in: *The Many Faces of the Sun*, ed. K. Strong *et al.* (Springer-Verlag, New York, 1999), p. 143.
49. I. M. Chertok, V. N. Obridko, E. I. Mogilevsky, *et al.*, Astrophys. J. **567**, 1225 (2002).