

УДК 523.985-866

## СОЛНЕЧНОЕ ЭРУПТИВНОЕ СОБЫТИЕ 4 НОЯБРЯ 2001 г. ПО ДАННЫМ ТЕЛЕСКОПА СПИРИТ НА СПУТНИКЕ КОРОНАС-Ф

© 2004 г. И. М. Черток<sup>1</sup>, В. А. Слемзин<sup>2</sup>, С. В. Кузин<sup>2</sup>, В. В. Гречнев<sup>3</sup>,  
О. И. Бугаенко<sup>4</sup>, И. А. Житник<sup>2</sup>, А. П. Игнатъев<sup>2</sup>, А. А. Перцов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн, Троицк, Россия

<sup>2</sup>Физический институт им. П.Н. Лебедева, Москва, Россия

<sup>3</sup>Институт солнечно-земной физики, Иркутск, Россия

<sup>4</sup>Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга, Москва, Россия

Поступила в редакцию 13.10.2003 г.; принята в печать 10.11.2003 г.

По данным телескопа СПИРИТ на спутнике КОРОНАС-Ф в трех УФ-каналах 175, 284 и 304 Å проанализированы крупномасштабные проявления солнечной активности, произошедшие 4 ноября 2001 г. после эрупции одного из самых значительных в 23-м цикле геоэффективных корональных выбросов массы. Показано, в частности, что перестройка магнитного поля над центром эрупции сопровождалась формированием многокомпонентной постэруптивной аркады, которая наблюдалась во всех трех каналах в течение многих часов и имела протяженность порядка  $0.5 R_{\odot}$ . По бокам этой аркады и вдоль некоторых протяженных образований вне активной области наблюдались, соответственно, компактные и канализированные димминги, в которых интенсивность излучения понизилась на десятки процентов. Наблюдаемое увеличенное свечение в вершине постэруптивной аркады может быть обусловлено энерговыделением, происходящим высоко в короне в процессе магнитного пересоединения на стадии релаксации возмущенного магнитного поля к новому равновесному состоянию с закрытой конфигурацией, а также повышенной мерой эмиссии при прохождении луча зрения одновременно через районы вершин и оснований петель, наблюдаемых под углом. Пространственное совпадение основных диммингов в разнотемпературных линиях указывает на их происхождение в результате истечения плазмы из структур переходного слоя и короны с открытыми силовыми линиями. Для некоторых диммингов, которые по-разному проявляются в различных линиях, важную роль, вероятно, играют также изменения температуры плазмы в связи с корональными выбросами массы.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Как известно (см. обзоры [1–5] и приведенную там библиографию), корональные выбросы массы (КВМ) и связанная с ними перестройка магнитного поля в обширной области солнечной атмосферы сопровождаются рядом крупномасштабных явлений. В частности, после больших КВМ типа гало в мягком рентгеновском и крайнем ультрафиолетовом (УФ) диапазонах на диске наблюдаются так называемые димминги и постэруптивные аркады со временем жизни от нескольких часов до суток.

Димминги или транзиентные корональные дыры представляют собой районы пониженной интенсивности излучения, которые формируются вслед за КВМ в окрестности эруптивного центра и могут охватывать значительную часть солнечного диска [1, 4, 6–9]. Димминги, примыкающие к эруптивному центру, по своей локализации и структуре обычно совпадают в разнотемпературных линиях,

что дает основание интерпретировать их как результат полного или частичного открытия корональных магнитных полей, приводящего к эвакуации вещества и соответствующему уменьшению интенсивности излучения. Прямые свидетельства истечения вещества из диммингов, расположенных вблизи эруптивного центра, получены в [10] по доплеровскому сдвигу нескольких УФ-линий. Вместе с тем, узкие и протяженные канализированные димминги, которые наблюдаются в условиях сложной глобальной солнечной магнитосферы [8], могут по-разному проявляться в различных спектральных линиях, что указывает определенную роль изменений температуры плазмы при формировании некоторых димминговых структур [9].

Яркая постэруптивная аркада часто развивается на месте существовавшей до события шировой (скрученной) сигмоидальной структуры и формируется за счет того, что магнитное поле в обширной зоне короны, сильно возмущенное КВМ, релакси-

рует к равновесному состоянию через магнитное пересоединение. Последнее происходит высоко в короне в протяженных токовых слоях и сопровождается длительным энерговыделением и образованием сравнительно простой, увеличивающейся в размерах системы петель, иногда с признаками шлемовидной структуры [2–7, 11–15].

В последние годы димминги и постэруптивные аркады, вызываемые КВМ, анализировались, в основном, по гелиограммам мягкого рентгеновского диапазона, полученным на телескопе Yohkoh/SXT [16], а также по УФ-данным телескопов SOHO/EIT [17] и, в меньшей степени, TRACE [18]. В настоящей работе крупное эруптивное событие, произошедшее 4 ноября 2001 г. после 16<sup>h</sup> UT, анализируется по данным, зарегистрированным на спутнике КОРОНАС-Ф [19] в трех каналах крайнего УФ-диапазона при помощи телескопа Ричи-Кретьена (284 Å) и телескопа Гершеля (175 и 304 Å), входящих в состав комплекса СПИРИТ [20]. Рассмотрение именно этого события и большой интерес к нему обусловлены двумя дополнительными обстоятельствами. Во-первых, в это время на SOHO/EIT не было наблюдений из-за проводившейся профилактики, а TRACE регистрировал активность в ограниченном поле зрения в стороне от центра эрупции. Во-вторых, это событие — одно из наиболее крупных и геоэффективных в текущем 23-м цикле активности. По многим своим характеристикам и параметрам оно сопоставимо с широко известным событием “День Бастилии” 14 июля 2000 г. [21]. Помимо существенных солнечных проявлений (см. ниже), оно сопровождалось, в частности, заметным возрастанием потока высокоэнергичных частиц на наземных нейтронных мониторах (GLE); поток протонов с энергией  $E > 10$  МэВ в течение нескольких часов после события достиг  $2 \times 10^3 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}$  и превысил  $10^4 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}$  во время прихода к Земле межпланетного возмущения; сильнейшая геомагнитная буря характеризовалась индексом  $D_{st} \approx -300$  нТл, а амплитуда форбуш-понижения галактических космических лучей на высокоширотных станциях была более 10% (см. Web-сайт Solar-Geophysical Data <http://sgd.ngdc.noaa.gov/sgd/jsp/solarindex.jsp>).

В разделе 2 приведены общие сведения о телескопах комплекса СПИРИТ, описаны используемые наблюдательные данные и методика их обработки. Раздел 3 содержит необходимые сведения о ситуации перед рассматриваемым эруптивным событием и некоторые характеристики самого события. Основным объектам анализа — постэруптивной аркаде и диммингам — посвящены разделы 4, 5. Обсуждение результатов анализа и заключительные замечания содержатся в разделе 6.

## 2. ДАННЫЕ И МЕТОДИКА АНАЛИЗА

Комплекс СПИРИТ [20] (см. также Web-сайт <http://www.xras.lebedev.ru>) включает в себя два телескопа крайнего УФ-диапазона: двухканальный телескоп-коронограф Гершеля, работающий в спектральных полосах 175 и 304 Å и четырехканальный телескоп Ричи-Кретьена, работающий в спектральных полосах 171, 195, 284 и 304 Å (по спектральным характеристикам он аналогичен телескопу EIT обсерватории SOHO [17]). Кроме того, в состав комплекса СПИРИТ входят спектрогелиографы на диапазон 177–207 Å и 285–335 Å и кристаллический спектрогелиограф на диапазон 8.42 Å (таблица).

В полосе  $175 \pm 5$  Å доминируют корональные линии FeIX–XI, излучаемые плазмой с температурой  $T_e \approx 1.5$  МК. Канал  $284 \pm 8$  Å содержит высокотемпературную ( $T_e \approx 2.0$  МК) линию FeXV. Полоса  $304 \pm 12$  Å включает в себя линию переходного слоя HeII ( $T_e \approx 0.05$  МК) и менее интенсивную корональную компоненту SiXI ( $T_e \approx 1.6$  МК).

Наблюдения Солнца с помощью аппаратуры СПИРИТ проводятся регулярно с 15 августа 2001 г. Программа наблюдений включает синоптические сеансы продолжительностью в среднем, от 10 до 48 мин, выполняемые регулярно с частотой 1–4 раза в сутки во всех спектральных каналах, и сеансы, проводимые по специальным программам: наблюдения динамики активных областей с временным разрешением до 10 с, наблюдения солнечной короны на расстояниях до  $3R_\odot$ , долговременные (до 20 сут) наблюдения на солнечносинхронных орбитах с разрешением 50–100 с, наблюдения вспышек с разрешением 7 с, спектроскопические наблюдения и т.д.

В день анализируемого события комплекс СПИРИТ по плану выполнял синоптические наблюдения (в интервале 12:19–12:20 UT) и наблюдения в нескольких спектральных каналах со скважностью 5 мин: в диапазоне 284 Å — в течение 18:38–19:04 UT, а в диапазонах 175 и 304 Å — в интервалах 17:03–17:29 UT и 20:13–20:39 UT. Отметим, что изображения в полосах 175 и 304 Å в телескопе Гершеля регистрировались синхронно с точностью до 10 мс при экспозиции 2 с. Кроме того, по несколько изображений в этих же длинах волн регистрировалось и на других витках. В частности, в каждом из двух диапазонов 175 и 304 Å получены гелиограммы, относящиеся к 11:11 UT.

По данным GOES, с 16:03 по 16:57 UT произошла рентгеновская вспышка класса X1.0, которая телескопом СПИРИТ не наблюдалась, поскольку спутник в это время находился в тени. В данном

Спектральные интервалы аппаратуры СПИРИТ и характерные температуры возбуждения ионов солнечной плазмы, излучающих в этих интервалах [19, 20]

Канал	Спектральный интервал, Å	Поле зрения, мин. дуги	Размер пиксела, сек. дуги	Ионы	$T$ , МК
Телескоп-коронोगраф Гершеля	$175 \pm 5$	$45 \times 50$	2.6	FeIX–FeXI	1–1.6
	$304 \pm 15$	Корона на $(2-5)R_{\odot}$		HeII, SiXI	0.05, 1.6
4-канальный телескоп Ричи-Кретьена	$171 \pm 3$	$42 \times 48$	2.5	FeIX–FeX	1–1.3
	$195 \pm 6$			FeXII	1.6
	$284 \pm 8$			FeXV	2
	$304 \pm 8$			HeII, SiXI	0.05, 1.6
Спектрогелиограф MgXII	8.418–8.423	$> 60$	4.2	MgXII	10
Спектрогелиограф XUV-диапазона	177–207	$> 60$	$5.2 \times 93$	OIV, FeIX–FeXXIV, CaXIV–CaXVII	0.3–16
	285–335		$7.5 \times 140$	HeII, SiXI, FeXV–FeXVI, MgVIII, NiXVII, CaXVII	0.05–5

случае имеется набор изображений в диапазонах 284, 175 и 304 Å, зарегистрированных за 4–5 ч до события, а также в интервале 4 ч после максимума вспышки. Несмотря на ограниченный характер данных, по полученным изображениям можно анализировать долговременные проявления КВМ: постэруптивную аркаду и димминги.

В течение нескольких часов после вспышки интенсивность аркады превышала светимость невозможных участков диска в десятки раз. Чтобы одновременно показать на гелиограммах структуру яркой аркады и слабоконтрастные детали, соответствующие изображения представлены нелинейно с использованием степенной функции.

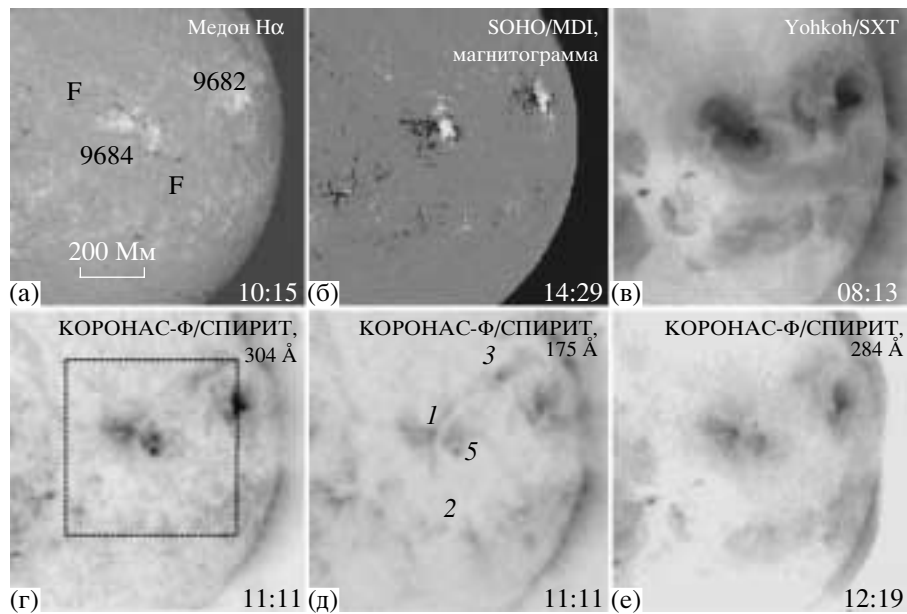
Димминги наиболее отчетливо проявляются на разностных изображениях, получаемых вычитанием гелиограммы до события из соответствующих гелиограмм в ходе или после события. Здесь димминги видны как темные образования пониженной интенсивности. Однако при простом вычитании изображений, тем более с многочасовыми интервалами, неизбежно появляются артефактные светлые и темные образования (ложные димминги), обусловленные перемещением наблюдаемых на диске структур за счет вращения Солнца. Чтобы это не происходило, в данной работе, как и в [8, 9], перед вычитанием применена процедура компенсации солнечного вращения: на каждой волне осуществлялся поворот (реротация) изображений в пределах диска к одному и тому же моменту времени перед событием. Реротация применена ко всей видимой полусфере с вращением сферической

поверхности на гелиоцентрическом расстоянии  $r \approx 1R_{\odot}$ . Такой вариант компенсации солнечного вращения не является идеальным, поскольку на самом деле трехмерные структуры, наблюдаемые в крайнем УФ, охватывают некоторый диапазон высот на больших гелиоцентрических расстояниях. Однако оценки показывают, что ошибки, вносимые за счет вращения сферы с  $r \approx 1R_{\odot}$ , незначительны и не могут существенно изменить наблюдаемую картину диммингов, во всяком случае, для событий, происходящих в центральном секторе солнечного диска.

Кроме данных телескопа СПИРИТ, в качестве вспомогательных в работе используются гелиограммы в линии  $H\alpha$ , магнитограммы с SOHO/MDI [22], а также гелиограммы в мягком рентгене с Yohkoh/SXT. Последние используются и при анализе постэруптивной аркады. Эти и другие дополнительные данные о рассматриваемом событии, в частности, информация о КВМ по измерениям на коронोगрафе белого света SOHO/LASCO [23], а также гелиограммы с комплекса КОРОНАС-Ф/СПИРИТ, представлены на Web-сайте <http://helios.izmiran.troitsk.ru/lars/Chertok/> в виде изображений и компьютерных фильмов.

### 3. СИТУАЦИЯ ПЕРЕД СОБЫТИЕМ

Источником эрупции была крупная активная область AR 9684, располагавшаяся к северо-западу от центра диска (координаты N06 W18)



**Рис. 1.** Гелиограммы западного сектора диска, иллюстрирующие ситуацию перед эруптивным событием 4 ноября 2001 г. Негативные изображения в мягком рентгене по данным Yohkoh/SXT (в) и в крайнем УФ в каналах (в порядке возрастания температуры) 304, 175, 284 Å по данным телескопа КОРОНАС-Ф/СПИРИТ. На кадрах (а, б) показаны гелиограмма обсерватории Медон в линии H $\alpha$  и магнитограмма продольной компоненты поля по измерениям на SOHO/MDI (белый и темный цвета соответствуют северной и южной полярностям).

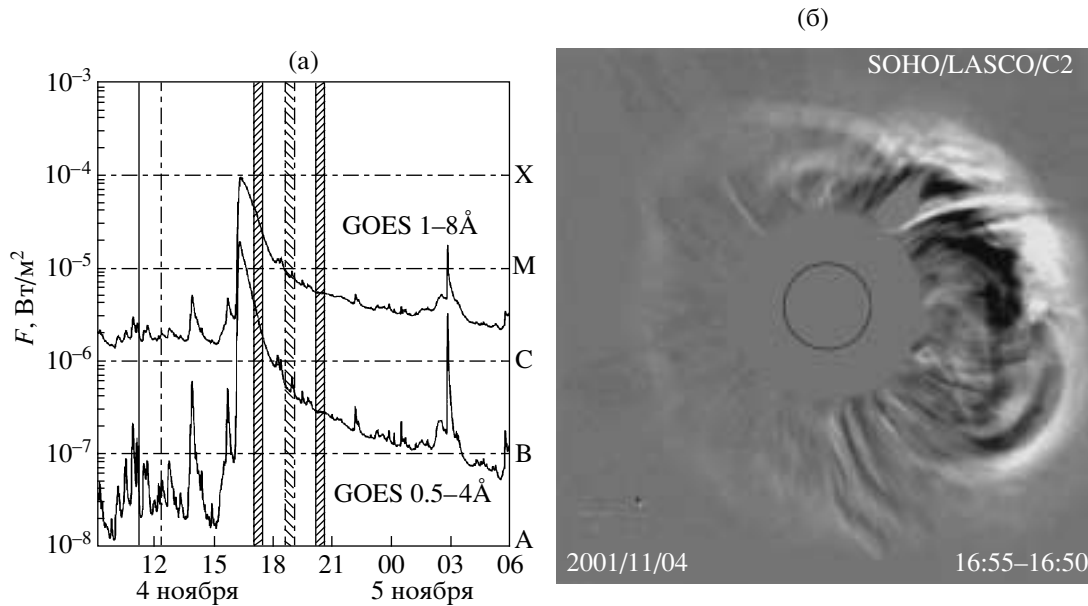
(рис. 1а). Видимый в линии H $\alpha$  флоккул пересекался протяженным волокном FF. На магнитограмме SOHO/MDI (рис. 1б) в пределах активной области видна соответствующая ему линия раздела полярностей фотосферного магнитного поля. Сопоставление с полученным на этом же инструменте изображением диска в континууме показывает, что основные пятна имели северную полярность и располагались к западу от волокна. Согласно более детальным данным, локализованные на небольшом расстоянии друг от друга ведущее и хвостовое пятна были окружены общей полутенью и, таким образом, формировали характерную для предвспышечной ситуации  $\delta$ -конфигурацию. Силовые линии из компактной группы пятен, по-видимому, замыкались на распределенные магнитные поля к востоку от волокна.

Как показывает изображение Yohkoh/SXT в мягком рентгене (рис. 1в), над волокном наблюдалась крупная высокотемпературная корональная аркада со скрученной (сигмоидальной) структурой (см. Web-сайт <http://solar.physics.montana.edu/nuggets/2001/011109/011109.html>). Последняя, как отмечалось во введении (см. также [24]), является признаком широкой магнитной конфигурации и свидетельствует о накопившейся избыточной энергии в ней и большой вероятности эруптивного события. Аналогичная сигмоидальная структура

наблюдалась перед событием и в горячей линии Mg XII прибором СПИРИТ.

Гелиограммы КОРОНАС-Ф/СПИРИТ, зарегистрированные в 11:11 UT на 175 и 304 Å и в 12:19 UT на 284 Å, т.е. примерно за 4–5 ч до события, представлены на рис. 1г–е. Они показывают, что в корональных линиях 175, 284 Å и линии переходного слоя 304 Å наблюдаются два района повышенной яркости, соответствующие хромосферным флоккулам по обе стороны от оптического волокна (линии смены полярностей поля). Во всех трех УФ-каналах предэруптивная рентгеновская аркада практически не видна, но выделяются компактные яркие узлы, которые располагаются по концам центральной части аркады и, скорее всего, обозначают фрагменты наиболее интенсивных петель. Кроме того (особенно в полосе 175 Å) видны узкие светящиеся структуры 1–2 и 1–3. Первая соответствует западной кромке ярких петель, окаймляющих рентгеновскую аркаду с юга, а вторая — визуализирует магнитную связь между AR 9684 и северной окрестностью западной области AR 9682.

Само событие (рис. 2) началось с исчезновения южной половины упоминавшегося выше H $\alpha$ -волокна и включало в себя вспышку большой длительности (LDE) балла 3В/X1.0 с максимумом в 16:20 UT. КВМ типа гало наблюдался на



**Рис. 2.** Временной ход мягкого рентгеновского излучения по измерениям на спутниках GOES (а) и разностное изображение КВМ по данным коронографа SOHO/LASCO/C2 (б). Вертикальными линиями на диаграмме (а) отмечены моменты и временные интервалы используемых в работе наблюдений на комплексе СПИРИТ: сплошная линия и частая штриховка относятся к каналам 175 и 304 Å, а штрих-пунктирная линия и редкая штриховка — к каналу 284 Å. Окружность в центре кадра (б) соответствует оптическому лимбу Солнца.

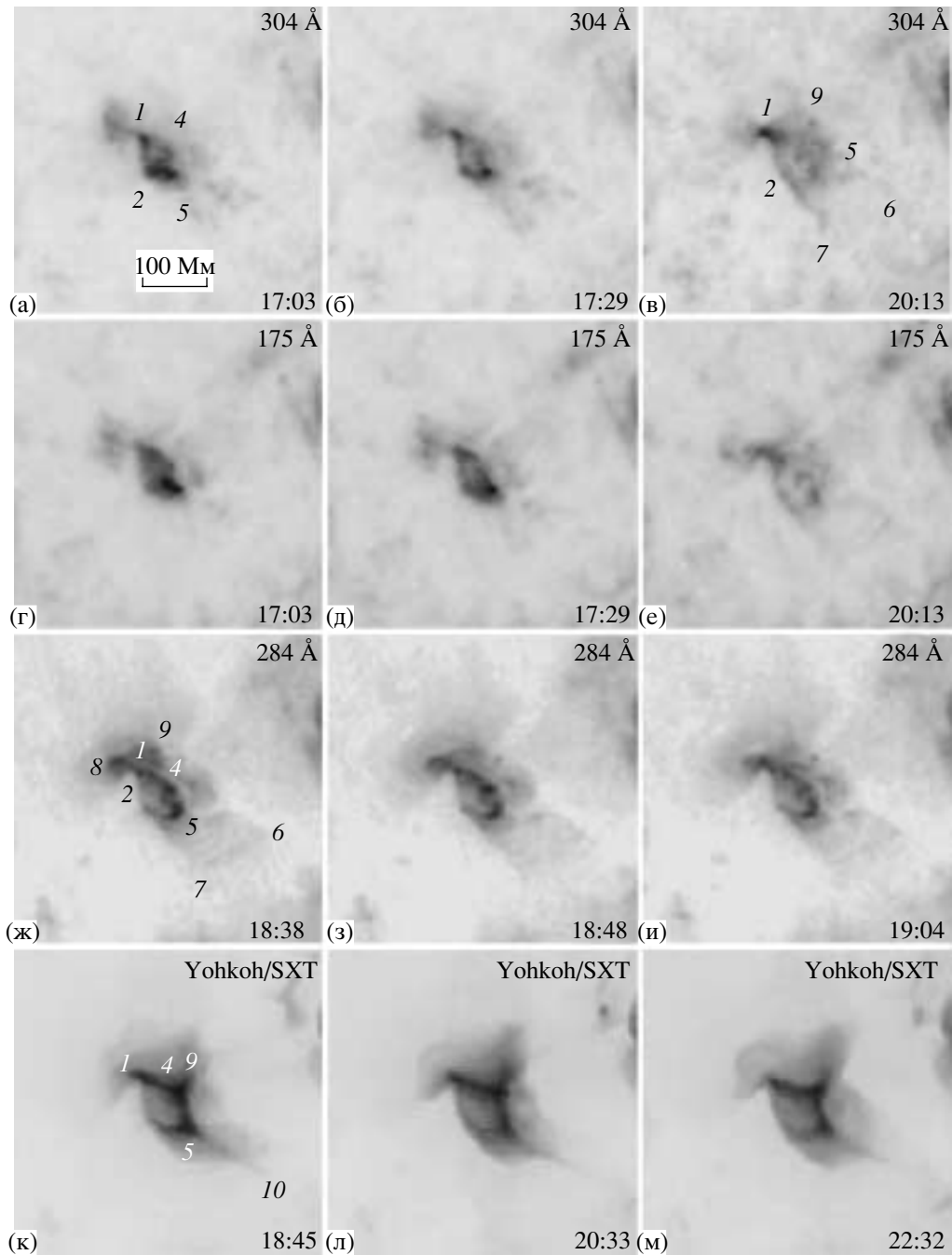
коронографе LASCO/C2, начиная с 16:35 UT, в виде яркой крупномасштабной петлеобразной структуры, поднимающейся над западным лимбом с весьма высокой скоростью в картинной плоскости  $\sim 1800$  км/с. К 16:40 UT менее интенсивное, но быстро усиливающее свечение транзientа охватило также восточный сектор лимба, и КВМ стал видимым вокруг всего затмевающего диска. После 17:00 UT фронт КВМ наблюдался по всем позиционным углам коронографа LASCO/C3 на фоне интенсивной засветки от приходящих к Земле многочисленных протонов с энергией десятки МэВ (см. Web-сайт [http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\\_list/](http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/)).

#### 4. ПОСТЭРУПТИВНАЯ АРКАДА

На рис. 3 показана постэруптивная аркада, которая сформировалась после максимума вспышки в мягком рентгене (16:20 UT) и существовала в течение многих часов. На первых из имеющихся кадров КОРОНАС-Ф/СПИРИТ на 304 и 175 Å в 17:03 UT (рис. 3а,г) видно, что в линии переходного слоя и низкотемпературных корональных линиях наиболее интенсивная (т.е. темная на негативных гелиограммах рис. 3) центральная часть аркады состояла из вытянувшейся с севера на юг системы петель. При этом наиболее яркие петли и их отдельные элементы наблюдались на торцах этой

структуры 1-4 и 2-5, а также на ее восточной (1-2) и западной (4-5) кромках. Это свойство аркады, в особенности преобладание западной кромки, становится все более заметным на протяжении последующих 26 мин наблюдений в каналах 304 и 175 Å (рис. 3б,д). Имеющиеся гелиограммы демонстрируют также, что дополнительные, гораздо менее интенсивные и диффузные петли располагались к северо-востоку, востоку и юго-западу от центральной части аркады.

Гелиограмма в высокотемпературной полосе 284 Å, относящаяся к 18:38 UT (рис. 3ж), поясняет многокомпонентную структуру и дальнейшее развитие аркады. Здесь отчетливо видно, что наиболее яркая структура 1-4-5-2 очерчивает северный и южный торцы, а также западную кромку центральной части аркады. В южном направлении эта компонента аркады переходит в менее интенсивную, но более широкую и отчетливую систему петель 5-6-7-2. Кроме этого, яркие петли 8-9 и окружающий их ореол наблюдаются в северной оконечности аркады. Менее отчетливой представляется компонента аркады, расположенная западнее яркой кромки 4-5. Если отождествление восточной кромки 1-2 с основаниями петель центральной части аркады довольно очевидно, то относительно интерпретации яркой западной кромки 4-5 имеются две возможности: она может представлять собой или тоже основания петель, или совокупность светящихся вершин петель



**Рис. 3.** Постэруптивная аркада на негативных гелиограммах КОРОНАС-Ф/СПИРИТ в УФ-каналах 304 Å (а–в), 175 Å (г–е), 284 Å по данным Yohkoh/SXT (к–м) и в мягком рентгене (ж, з). Показана часть западного сектора диска, очерченная пунктиром на рис. 1г.

(так называемый “позвоночник” постэруптивной аркады [25, 26]).

Ответ на этот вопрос дает сопоставление с рентгеновской гелиограммой Yohkoh/SXT (рис. 3к). В высокотемпературной ( $T_e > 2.5$  МК) плазме на момент 18:45 UT на северном торце центральной компоненты аркады видна не только восточная (1–4), но и частично западная ветвь 4–9 петлеоб-

разной структуры, а ее центр (т.е. вершина 4 этой петлеобразной структуры) является началом яркой кромки 4–5. Более того, эта кромка имеет хорошо наблюдаемое продолжение в юго-восточном направлении в виде яркого луча 5–10, проходящего через центральную зону южной компоненты аркады. Следовательно, можно сделать вывод, что видимая в каналах 304, 175, 284 Å, а также в мягком

рентгене яркая кромка 4–5, как и ее продолжение 5–10, представляет собой светящиеся вершины петель, формирующих постэруптивную аркаду. При этом вследствие наблюдаемой ориентации аркады такой “позвоночник” в центральной части аркады в проекции на картинную плоскость, возможно, совпадает с лентой западных оснований петель.

В ходе дальнейшего развития аркады в низкотемпературных каналах 304 и 175 Å (рис. 3в, е) через 3 ч свечение в вершинах петель ее центральной компоненты существенно ослабло, и наиболее заметными стали протяженные светящиеся структуры 1–2–7 и 9–5–6, обозначающие, соответственно, восточные и западные основания постэруптивных петель. Как показывает анализ, эти структуры совпадали по форме и локализации с характерными для эруптивных событий расходящимися послевспышечными  $H\alpha$ -лентами. При этом в высокотемпературном канале 284 Å (рис. 3з, и), по крайней мере, в течение десятков минут и в мягком рентгене (рис. 3л, м) на протяжении 4 ч сохранялась повышенная интенсивность свечения в вершинах петель центральной и южной компонент аркады.

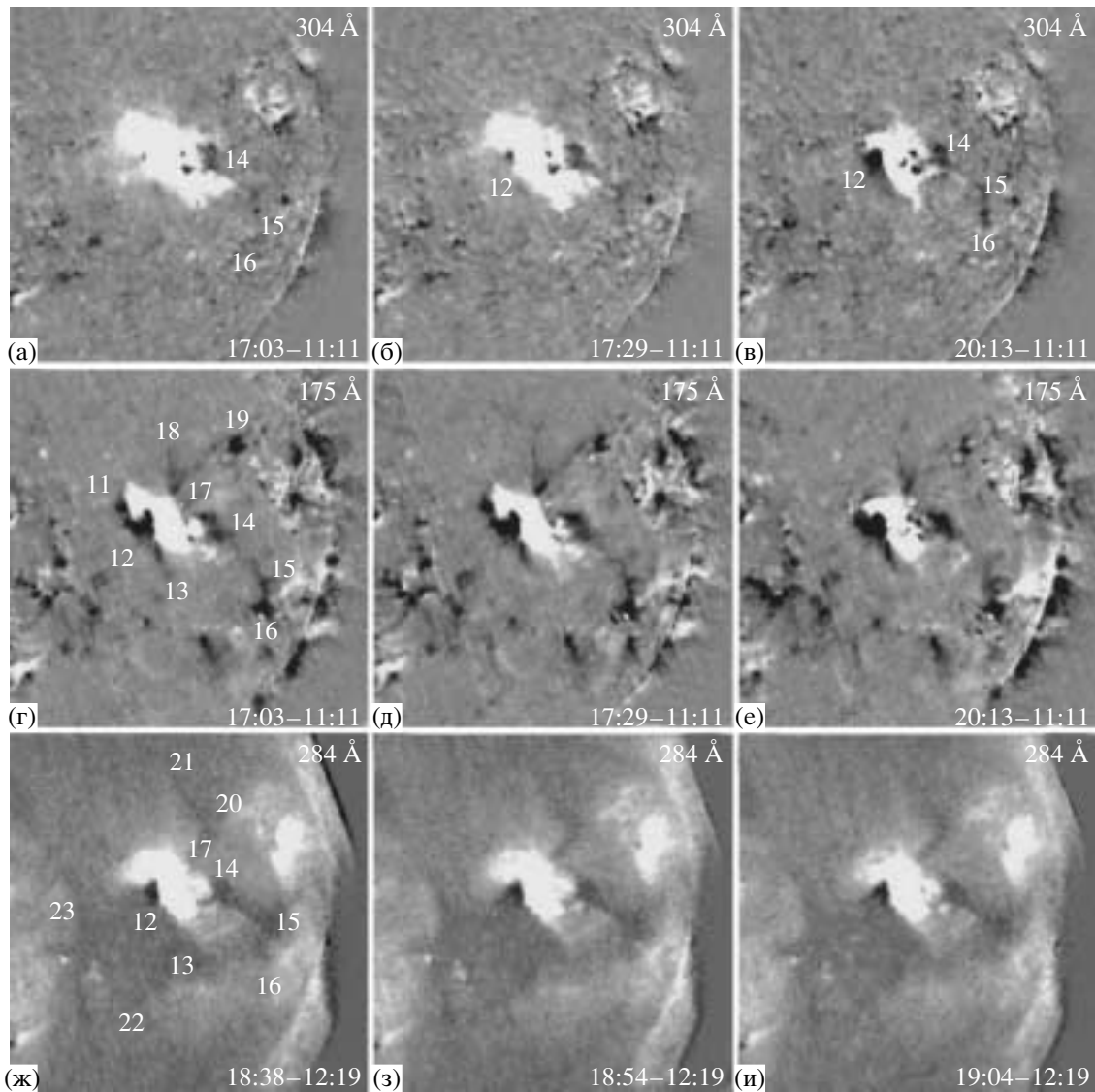
К сказанному следует добавить, что рассматриваемая постэруптивная аркада развивалась над  $H\alpha$ -волоком и линией смены полярностей fotosферного магнитного поля, на месте скрученной предэруптивной структуры (рис. 1). При этом яркая центральная компонента постэруптивной аркады наблюдалась в пределах активной области, а ее более диффузная южная компонента — над зоной частичного исчезновения оптического волокна. Протяженность яркой центральной части аркады составляла около 110–130 тыс. км, а с учетом относительно слабых южной и северной компонент, в частности, на 284 Å (рис. 3ж—и), достигала 330 тыс. км. Такая длина аркады характерна для самых крупных эруптивных событий, происходящих в зоне активных областей. В частности, в уже упоминавшемся событии “День Бастилии” 14 июля 2000 г. УФ-постэруптивная аркада имела общую протяженность около 200 тыс. км [21].

## 5. ДИММИНГИ

Значительные размеры и многокомпонентная структура постэруптивной аркады видны также на реротированных разностных гелиограммах, представленных на рис. 4, где показан тот же западный сектор диска, что и на рис. 1. Здесь центральная и северная компоненты аркады видны в насыщении, поскольку пороги интенсивности выбраны с таким расчетом, чтобы оптимальным образом представить димминги, которыми сопровождалось рассматриваемое событие. В качестве базовых предэруптивных изображений, с которыми сравнивались все последующие гелиограммы,

зарегистрированные на телескопе СПИРИТ во время анализируемого события, использовались кадры 11:11 UT для каналов 175, 304 Å и 12:19 UT для канала 284 Å. Несмотря на значительный интервал между этими кадрами и началом события (4–5 ч), их можно принять за базовые, поскольку, по имеющимся данным мировой сети обсерваторий, в течение этого интервала на Солнце и, в частности, на западной половине диска не происходило сколько-нибудь значительных вспышек и эрупций. Отсюда следует, что основные изменения, видимые на разностных изображениях в активной области AR 9684 и в прилегающих к ней районах, можно рассматривать как проявления интересующего нас эруптивного события. Подчеркнем еще раз, что, как и в [8, 9], процедура получения корректных разностных изображений со столь большим временным интервалом включала в себя совершенно необходимую предварительную реротацию гелиограмм к одному и тому же моменту времени. В данном случае вращение Солнца скомпенсировано поворотом гелиограмм ко времени первых из имеющихся кадров, зарегистрированных на телескопе СПИРИТ после максимальной фазы события: 17:03 UT для изображений на 175, 304 Å и 18:38 UT для изображений на 284 Å.

Начнем рассмотрение диммингов с полосы 175 Å, поскольку, как показано в [9], обычно они проявляются наиболее отчетливо в корональных линиях с умеренной температурой возбуждения. На рис. 4г, относящемся к моменту 17:03 UT, кроме ярко светящейся аркады, видны устойчивые темные структуры, в которых интенсивность, по сравнению с базовым изображением, оказалась заметно пониженной. Это и есть димминги. Прежде всего, выделяются относительно компактные димминги 11–12–13 и 14, непосредственно примыкающие к постэруптивной аркаде с восточной и западной сторон. Наряду с ними, имеются несколько узких протяженных, канализированных диммингов. Один из них (14–15–16) простирается от западного компактного димминга в сторону юго-западного лимба. Еще два канализированных димминга (17–18 и 17–19) исходят из диммингового узла в северной оконечности аркады в северном и северо-западном направлениях. Длина указанных канализированных диммингов сравнима с протяженностью постэруптивной аркады или превышает ее. Заметим, что на этом разностном изображении присутствуют и другие темные структуры, локализованные, в частности, к востоку и югу от аркады на значительном расстоянии от нее, а также вблизи западного лимба. Однако они непосредственно не соединены с аркадой, и вопрос об их происхождении и возможной связи с рассматриваемым



**Рис. 4.** Ротированные разностные изображения того же западного сектора диска, что на рис. 1, демонстрирующие яркую постэруптивную аркаду и темные димминги в УФ-каналах 304 Å (а–в), 175 Å (г–е), 284 Å (ж–и) по данным телескопа КОРОНАС-Ф/СПИРИТ.

событием остается открытым. Как показывают разностные гелиограммы 17:29 и 20:13 UT (рис. 4д,е), основные из указанных диммингов в полосе 175 Å продолжали существовать в почти неизменном виде и в следующие 3 ч. Это относится, в частности, к компактным диммингам 12–13 и 14, а также к юго-западному канализированному диммингу 14–15–16. Что касается северного и северо-западного димминговых каналов 17–18 и 17–19, то они за это время несколько ослабли, хотя сохранили свою форму и локализацию.

Основные димминговые структуры с некоторыми незначительными отличиями присутствуют и на аналогичных разностных изображениях в самой высокотемпературной полосе 284 Å (рис. 4ж–и).

Здесь видны центральная (12) и частично южная (12–13) компоненты восточного димминга, в то время как вместо наблюдавшегося на 175 Å северного фрагмента этого димминга присутствует некоторое уярчение. На 284 Å видны также западный компактный димминг 14 и исходящий из него юго-западный димминговый канал 14–15–16, огибающий южную компоненту постэруптивной аркады. При этом на месте северо-западных канализированных диммингов наблюдается относительно слабая изогнутая димминговая структура 17–20–21. Имеющиеся гелиограммы в полосе 284 Å показывают также, что к восточному компактному диммингу 12, возможно, примыкает



относительно слабая, но большая по площади транзиентная корональная дыра 12-13-22-23.

На разностных гелиограммах в низкотемпературной полосе  $304 \text{ \AA}$  (рис. 4а-б) также обнаруживаются примыкающий к аркаде компактный западный димминг 14 и частично юго-западный димминговый канал 14-15-16. При этом почти никаких признаков северо-западных канализированных диммингов не наблюдается. Самое существенное отличие от димминговых проявлений в полосах 175 и  $284 \text{ \AA}$  состоит в том, что сначала (рис. 4а) центральная часть восточного компактного димминга 12 в канале  $304 \text{ \AA}$  присутствует лишь в виде небольшого темного элемента. В интервале 17:03–17:29 UT (рис. 4б) происходило постепенное увеличение площади этого димминга. Только к 20:13 UT (рис. 4в) он приобрел примерно такие же формы и площадь, какие наблюдались на первых кадрах в полосах 175 и  $284 \text{ \AA}$  (рис. 4г,ж). На гелиограмме 20:13 UT в полосе  $304 \text{ \AA}$  юго-западный канализированный димминг 14-15-16 также проявляется наиболее отчетливо. Заметим, что темные элементы, видимые в полосе  $304 \text{ \AA}$  в пределах центральной части постэруптивной аркады, образовались в результате угасания или перемещения ярких образований, присутствовавших на базовой гелиограмме 11:11 UT (рис. 1г).

При рассмотрении гелиограмм в полосе  $304 \text{ \AA}$  следует иметь в виду, что, в принципе, в наблюдаемые изменения интенсивности, наряду с линией переходного слоя HeII, может вносить вклад и корональная линия SiXI. В данном случае вклад последней, видимо, не является определяющим. В пользу этого утверждения свидетельствуют описанные выше различия между диммингами в полосе  $304 \text{ \AA}$  с одной стороны, и в каналах 175 и  $284 \text{ \AA}$ , с другой. К тому же, как показывает сопоставление с предэруптивными гелиограммами (рис. 1), в результате эрупции диммингам подверглись, в основном, структуры, локализованные или на самой периферии активной области, или в стороне от нее. В частности, совпадающие (во всяком случае, в конце события) во всех трех разнотемпературных полосах компактные димминги 12-13 и 14 локализируются вдоль восточной кромки 1-2 и юго-западного торца 5 предэруптивной аркады, а юго-западный димминговый канал 14-15-16 и наблюдавшийся, в основном, в полосе  $175 \text{ \AA}$  канализированный димминг 17-19 отождествляются со светящимися структурами, идущими от AR 9684, соответственно, к северо-западному и юго-восточному прилиббовым секторам диска.

Данные о степени понижения интенсивности в диммингах по сравнению с доэруптивным уровнем, т.е. об их глубине, представлены на рис. 5. Здесь

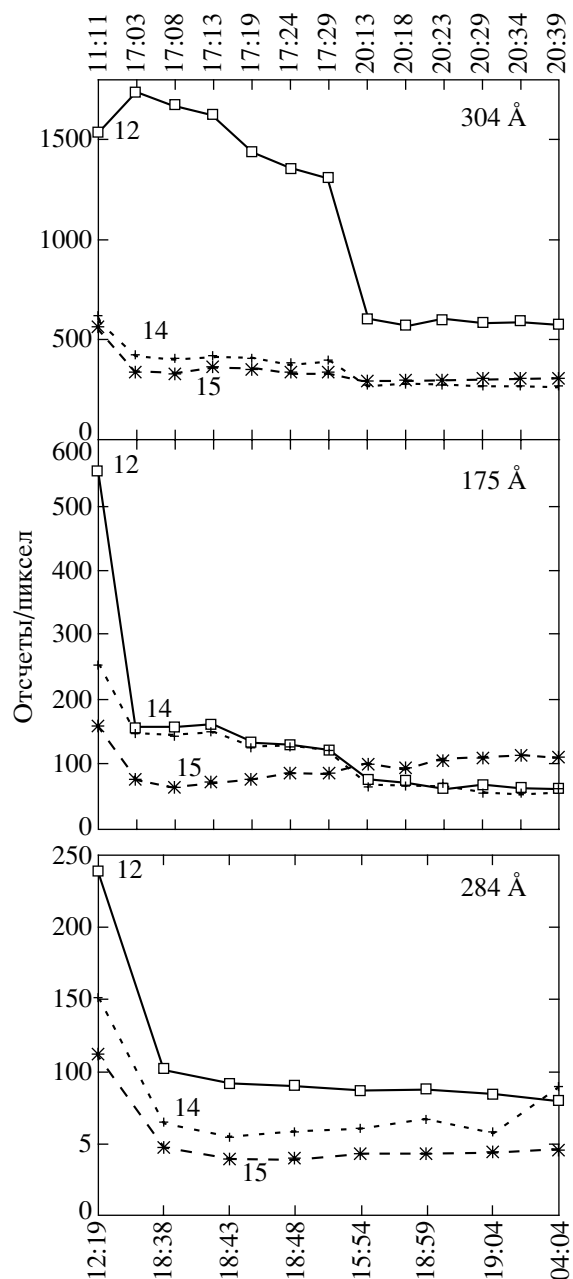


Рис. 5. Изменения интенсивности в пределах площадки  $22'' \times 22''$  в центре основных диммингов, обозначенных соответствующими номерами на рис. 4 в зависимости от времени регистрации последовательных кадров.

для трех спектральных полос показаны изменения в ходе события интенсивности излучения, проинтегрированной по площадке размером  $22'' \times 22''$  в центральной части основных диммингов, обозначенных соответствующими номерами на рис. 4. Поскольку, как отмечалось выше (см. раздел 2 и рис. 2), временные интервалы между соседними кадрами довольно сильно различаются, на оси абсцисс указано время регистрации последовательных кадров. Из приведенных на рис. 5 кривых видно,

что во всех трех участках УФ спектра глубина диммингов достигает десятков процентов. При этом глубина канализованных диммингов несколько ниже, чем диммингов близи эруптивного центра. Самую большую глубину (40–70%) имеют восточный (12) и западный (14) компактные димминги в корональных линиях 175 и 248 Å (рис. 5б,в). В линии переходного слоя 304 Å (рис. 5а), глубина этих диммингов также значительна (30–60%). Кроме того, видно, что в полосе 304 Å развитие восточного димминга 12 не только по площади (см. выше), но и по глубине происходило с заметной временной задержкой по сравнению с остальными диммингами. Если во всех диммингах в корональных линиях и в западном димминге 14 в полосе переходного слоя основное понижение интенсивности зафиксировано на первых из имеющихся кадрах после начала события (17:03 UT на 175 и 304 Å и 18:38 UT на 284 Å), то излучение восточного димминга 12 в канале 304 Å существенно уменьшилось между 17:29 и 20:13 UT. Из рис. 5 следует также, что пониженный уровень интенсивности как в корональных диммингах, так и в диммингах переходного слоя, сохранялся на протяжении нескольких часов.

## 6. ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ одного из самых крупных и геоэффективных КВМ по данным телескопа КОРОНАС-Ф/СПИРИТ в трех разнотемпературных УФ-каналах 175, 284 и 304 Å демонстрирует долговременные крупномасштабные явления, которые характерны для постэруптивной фазы такого рода событий — постэруптивную аркаду и димминги.

Структура постэруптивной аркады в анализируемом событии свидетельствует о произошедшем в процессе КВМ переходе от сложной широкой структуры магнитного поля, наблюдавшейся, в частности, в мягком рентгене перед событием, к топологически более простой системе горячих петель иной ориентации — расположенных поперек протяженного волокна, проходившего через активную область [3]. Таким образом, магнитная конфигурация после эрупции не тождественна предэруптивной, а существенно от нее отличается. Этот факт представляется убедительным аргументом в пользу магнитного пересоединения. В данном случае аркада имела полную протяженность почти  $0.5 R_{\odot}$ . Ее наиболее яркие центральная и северная части наблюдались в пределах активной области (т.е. в районе сильных магнитных полей), а широкая, но гораздо менее яркая южная компонента сформировалась над районом исчезновения волокна за

пределами активной области. В целом, постэруптивная аркада, по-видимому, образовалась в области структур, которые были вовлечены в процесс эрупции КВМ и подверглись самым значительным возмущениям.

В наблюдавшейся постэруптивной аркаде максимальной яркостью, особенно в высокотемпературном канале 284 Å и мягком рентгене, в течение нескольких часов обладали не основания, а вершины петель. Аналогичный светящийся “позвоночник” аркады зарегистрирован во многих других эруптивных событиях [12, 26]. В частности, в событии “День Бастилии” 14 июля 2000 г., произошедшем в центральном секторе диска, он наблюдался между двумя яркими лентами, соответствующими основаниям многочисленных петель, образующих постэруптивную аркаду [14, 15, 27]. Это явление объясняется нагревом плазмы за счет длительного постэруптивного энерговыделения в расположенных высоко в короне токовых слоях [15, 28, 29], когда открывшиеся или вытянутые при эрупции КВМ магнитные силовые линии релаксируют к новому равновесному, замкнутому состоянию посредством магнитного пересоединения. При таком характере энерговыделения прежде всего формируются горячие петли. По этой причине некоторые элементы наблюдаемой в нашем случае аркады, в частности, ее южная компонента, наиболее отчетливо видна в высокотемпературном канале. Другая возможная причина повышенного излучения в верхней части аркады — увеличение продольной меры эмиссии при прохождении луча зрения через толщу петли в районе ее вершины. В пользу этого говорят многочисленные наблюдения прилимовых событий с отчетливым уярчением в области вершин петель (см., например, [30]). В нашем случае местоположение и ориентация аркады были такими, что лучи зрения, проходившие через верхнюю часть петель, могли пересекать также и западные основания петель, в которых плотность плазмы увеличена вследствие испарения хромосферного вещества.

Анализ диммингов — продолжительных и глубоких постэруптивных депрессий — стал возможным благодаря использованию примененной в [8, 9] методике компенсации вращения солнечного диска и формирования реротированных разностных изображений по гелиограммам, разделенным многочасовыми временными интервалами. В данном случае, как и в других эруптивных событиях, происходящих в условиях сложной глобальной магнитосферы, характерной для максимума солнечного цикла, обнаружилось димминги двух разновидностей: (1) компактные, ярко выраженные димминги, примыкающие к эруптивному центру, и (2) узкие, протяженные канализованные димминги, простирающиеся от центра эрупции к удаленным районам диска. Компактные димминги вблизи эруптив-

ного центра и некоторые канализированные димминги, в основном, совпадали по своей структуре и локализации в линиях с разной температурой возбуждения в каналах 175, 284 и 304 Å. На основе этого факта можно заключить, что такие димминги образовались в результате длительного существования структур, расположенных, в частности, по бокам постэруптивной аркады, с полностью или частично открывшимися в процессе КВМ силовыми линиями магнитного поля. В результате истечения плазмы вдоль открытых силовых линий ее плотность в таких структурах оказывается пониженной, что и приводит к уменьшению интенсивности УФ-излучения [1, 4, 6–10]. Дополнительным аргументом в пользу такой модели образования диммингов является тот факт, что время их существования измеряется многими часами, и возврат димминговых структур к замкнутой конфигурации происходит весьма медленно (см., например, [31, 32]). Что касается отдельных участков компактных и канализированных диммингов, которые по-разному проявились в различных корональных линиях и линии переходного слоя, то их происхождение в значительной степени, возможно, обусловлено изменениями температуры плазмы в процессе эрупции КВМ.

Наличие диммингов как в корональных линиях, так и в линии переходного слоя означает, что процессы их формирования или за счет открытия силовых линий, или за счет изменений температуры плазмы затрагивали не только корону, но и относительно холодную плазму переходного слоя. На примере восточного и западного компактных диммингов 12 и 14, которые в канале 304 Å обнаружили различное поведение во времени, видно, что вовлечение структур переходного слоя в процесс эрупции КВМ и формирование в них диммингов может происходить как синхронно с их развитием на корональных высотах, так и с существенной временной задержкой порядка десятков минут.

В целом, наличие в рассматриваемом событии крупномасштабной постэруптивной аркады и протяженных канализированных диммингов свидетельствует о том, что процесс КВМ затрагивал не только различные слои магнитосферы над центром эрупции, но и более глобальные структуры, значительно превышающие по своим масштабам размеры активной области.

Авторы благодарны участникам проекта КОРОНАС-Ф, его руководителям В.Н. Ораевскому и И.И. Собельману, коллективам Центра данных дистанционного зондирования DLR (Нойштрелиц, Германия) и Центра космических информационных технологий ИЗМИРАН (Троицк, Россия) за наблюдательные материалы, послужившие основой

для настоящей работы. Авторы признательны также коллективам телескопа Yohkoh/SXT, магнитографа SOHO/MDI, коронографа SOHO/LASCO, спутника GOES и обсерватории Медон за дополнительные данные, использованные при анализе. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 02-02-17272, 03-02-16049, 03-02-16591) и Минпромнауки РФ (гранты НШ 477.2003.2 и 1445.2003.2).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. H. S. Hudson and D. F. Webb, in *Coronal Mass Ejections*, Eds N. Crooker, J. Joselyn, and J. Feynman, AGU Geophysical Monograph Series, №. **99**, 27 (1997).
2. D. F. Webb, *J. Atmosph. and Solar-Terr. Phys.* **62**, 1415 (2000).
3. A. C. Sterling, *J. Atmosph. and Solar-Terr. Phys.* **62**, 1427 (2000).
4. N. Gopalswamy and B. J. Thompson, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* **62**, 1427 (2000).
5. H. S. Hudson and E. W. Cliver, *J. Geophys. Res.* **106**, 25199 (2001).
6. B. J. Thompson, S. P. Plunkett, J. B. Gurman, *et al.*, *Geophys. Res. Lett.* **25**, 2465 (1998).
7. D. M. Zarro, A. C. Sterling, B. J. Thompson, *et al.*, *Astrophys. J.* **520**, L139 (1999).
8. И. М. Черток, В. В. Гречнев, *Астрон. журн.* **80**, 162 (2003).
9. И. М. Черток, В. В. Гречнев, *Астрон. журн.* **80**, 1013 (2003).
10. L. K. Harra and A. C. Sterling, *Astrophys. J.* **561**, L215 (2001).
11. S. Kahler, *Astrophys. J.* **214**, 891 (1977).
12. J. A. Klimchuk, L. W. Acton, K. L. Harvey, *et al.*, in *X-ray Solar Physics from Yohkoh*, Eds Y. Uchida, T. Watanabe, K. Shibata, and H. S. Hudson, Universal Academy Press, Tokyo, 181 (1994).
13. A. C. Sterling and H. S. Hudson, *Astrophys. J.* **491**, L55 (1997).
14. L. Fletcher and H. Hudson, *Solar Phys.* **204**, 71 (2001).
15. M. J. Aschwanden and D. Alexander, *Solar Phys.* **204**, 93 (2001).
16. S. Tsuneta, L. Acton, M. Bruner, *et al.*, *Solar Phys.* **136**, 37 (1991).
17. J.-P. Delaboudinière, G. E. Artzner, J. Brunaud, *et al.*, *Solar Phys.* **162**, 291 (1995).
18. B. N. Handy, L. W. Acton, C. C. Kankelborg, *et al.*, *Solar Phys.* **187**, 229 (1999).
19. В. Н. Ораевский, И. И. Собельман, *Письма в "Астрон. журн."* **28**, 457 (2002).
20. I. A. Zhitnik, O. I. Bougaenko, J.-P. Delaboudinière, *et al.*, *Proc. 10th European Solar Phys. Meet., ESA SP-506*, 915, 2002.
21. O. Engvold and Z. Švestka, *Solar Phys.* **204**, (2001).
22. P. H. Scherrer, R. S. Bogart, R. L. Bush, *et al.*, *Solar Phys.* **162**, 129 (1995).

23. G. E. Brueckner, R. A. Howard, M. J. Koomen, *et al.*, *Solar Phys.* **162**, 357 (1995).
24. R. C. Canfield, H. S. Hudson, D. E. McKenzie, *Geophys. Res. Lett.* **26**, 627 (1999).
25. Z. Švestka and E. Cliver, in *Eruptive Solar Flares*, Eds Z. Švestka et al., Springer, New York, 1 (1992).
26. A. H. McAllister, Y. Uchida, J. I. Khan, and K. Shibata, in *X-ray Solar Physics from Yohkoh*, Eds Y. Uchida, T. Watanabe, K. Shibata, and H. S. Hudson, Universal Academy Press, Tokyo, 189 (1994).
27. I. M. Chertok, V. V. Fomichev, A. A. Gnezdilov, *et al.*, *Solar Phys.* **204**, 141 (2001).
28. J. M. McTiernan, S. R. Kane, J. V. Loran, *et al.*, *Astrophys. J.* **416**, L91 (1993).
29. М. А. Лившиц, О. Г. Бадалян, А. В. Белов, *Астрон. журн.* **79**, 659 (2002).
30. P. T. Gallagher, B. R. Dennis, S. Krucker, *et al.*, *Solar Phys.* **210**, 341 (2002).
31. V. G. Fainshtein, G. V. Rudenko, V. V. Grechnev, *Solar Phys.* **181**, 133 (1998).
32. S. W. Kahler and H. S. Hudson, *J. Geophys. Res.* **106**, 29239 (2001).

## Analysis of a Solar Eruptive Event Using CORONAS-F SPIRIT Data

**I. M. Chertok, V. A. Slemzin, S. V. Kuzin, V. V. Grechnev, O. I. Bugaenko, I. A. Zhitnik,  
A. P. Ignat'ev, and A. A. Pertsov**

The paper studies large-scale solar activity following the eruption of a very powerful, geoefficient coronal mass ejection in the 23rd cycle, observed at 175, 284, and 304 Å on November 4, 2001 using the CORONAS-F SPIRIT telescope. In particular, it is shown that the restructuring of the magnetic field above the eruption center was accompanied by the formation of a multi-component post-eruptive arcade, which was observed in all three channels over many hours and had an extent of the order of  $0.5 R_{\odot}$ . Compact and channeled dimmings with their radiation intensity decreased by tens of percent were observed on either side of this arcade and along some extended objects beyond the active region. The observed increase in the emission at the apex of the post-eruptive arcade can be attributed to energy release during magnetic reconnection in the high corona during the relaxation of the disturbed magnetic field to a new equilibrium state with a closed configuration, and also to an enhanced emission measure due to the simultaneous crossing of the line of sight of both apexes and bases of loops observed at some angle. The spatial coincidence of the main dimmings of lines of various temperatures indicates that the plasma outflow from the transition region and coronal structures with open field lines is responsible for these dimmings. Variations in the plasma temperature associated with coronal mass ejections probably play an important role for some dimmings, which appear to be different in different lines.