

УДК 523.945–46

КРУПНОМАСШТАБНЫЕ КАНАЛИЗИРОВАННЫЕ ДИММИНГИ, ВЫЗЫВАЕМЫЕ КОРОНАЛЬНЫМИ ВЫБРОСАМИ МАССЫ НА СОЛНЦЕ

© 2003 г. И. М. Черток, В. В. Гречнев

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн, Троицк, Россия
Институт солнечно-земной физики, Иркутск, Россия

Поступила в редакцию 13.06.2002 г.; принята в печать 21.08.2002 г.

В результате анализа разностных изображений Солнца, полученных с помощью УФ-телескопа SOHO/EIT на волне 195 Å, обнаружена новая разновидность “диммингов” или транзитных корональных дыр (т.е. областей пониженной интенсивности мягкого рентгеновского и крайнего УФ-излучения), которые наблюдаются на солнечном диске после корональных выбросов массы (КВМ) типа гало. Установлено, что в крупных событиях при наличии на диске нескольких активных областей, волокон и других структур, наряду с относительно компактными диммингами, примыкающими к эруптивному центру, имеют место сильно анизотропные, сравнимые по контрасту канализированные димминги, которые простираются вдоль нескольких узких протяженных структур (каналов) и могут охватывать почти весь видимый диск. При этом корональные волны, которые наблюдаются как фронты повышенной яркости, распространяющиеся в ряде КВМ-событий перед диммингами, также имеют анизотропный характер. Аргументируется, что указанные транзитные явления тесно связаны с сильным возмущением и перестройкой крупномасштабных магнитных структур, вовлеченных в процесс КВМ, а канализированный характер диммингов отражает сложность глобальной солнечной магнитосферы, в частности, вблизи максимума цикла солнечной активности.

1. ВВЕДЕНИЕ

Корональные выбросы массы (КВМ) — наиболее крупномасштабные явления спорадической солнечной активности, играющие важную, часто определяющую роль во многих солнечных, межпланетных и геофизических событиях (см, например, обзоры [1–6] и приведенную там библиографию). Если во вспышках реализуется энергия, накапливаемая в локальных магнитных полях активных областей, то возникновение КВМ, скорее всего, обусловлено динамикой крупномасштабных магнитных полей, эволюцией глобальной солнечной магнитосферы и неустойчивостью ее отдельных структур, например, корональных лучей, протуберанцев (волокон), крупных аркад, и т.д. Значительный прогресс в изучении КВМ достигнут в последние годы, в первую очередь, благодаря наблюдениям на космических обсерваториях Yohkoh [7] и SOHO [8].

Над лимбом, на гелиоцентрических расстояниях до $30 R_S$ (радиусов Солнца) КВМ, поднимающиеся в короне со скоростью до 2000 км/с, фиксируются в белом свете при помощи коронографа SOHO/LASCO [9] за счет рассеяния фотосферного излучения на свободных электронах, концентрация которых существенно повышена внутри вы-

броса. При этом часто уже на малых расстояниях от Солнца размеры КВМ значительно больше оптического солнечного диска. Трансэкваториальный характер и глобальный масштаб КВМ проявляются, в частности, в том, что во многих крупных событиях основания наблюдаемого петлеобразного транзита опираются на структуры, локализованные в противоположных (южной и северной) полусферах Солнца.

Большое значение для изучения КВМ имеют наблюдения процессов, происходящих на диске до, во время и после эрупции. Высококачественные изображения, полученные при помощи телескопов Yohkoh/SXT [10] и SOHO/EIT [11], показывают, что существенная перестройка и крупномасштабные возмущения магнитных полей в связи с КВМ наиболее ярко проявляется в виде так называемых “диммингов” и корональных волн. Димминги или транзитные корональные дыры [12–17] представляют собой области пониженной интенсивности мягкого рентгеновского и крайнего УФ-излучения с временем жизни от нескольких часов до десятков часов, которые формируются вслед за КВМ в окрестности эруптивного центра, например, на периферии сигмоидальной структуры, и могут охватывать значительную часть солнечного

диска. Как показывает анализ [15, 16], наиболее интенсивные димминги наблюдаются одновременно в нескольких УФ-линиях (FeIX/X 171 Å, FeXII 195 Å, FeXV 284 Å), чувствительных к корональной плазме с разной температурой в диапазоне $(1.2\text{--}2.0) \times 10^6$ К, а также в мягком рентгене, соответствующем температуре $> 2.5 \times 10^6$ К. Это дает основание интерпретировать димминги как результат полного или частичного открытия корональных магнитных полей внутри этих структур, что приводит к эвакуации вещества и соответствующему уменьшению интенсивности излучения. Перед развивающимися диммингами довольно часто наблюдается светящийся фронт — корональная (или EIT-) волна, которая может распространяться от центра эрупции со скоростью порядка нескольких сотен км/с [15, 18–20]. Согласно одной точке зрения [19, 21, 22], EIT-волна — это инициируемое КВМ МГД-возмущение, которое является корональным аналогом хромосферной волны Мортон, наблюдаемой в линии H_α [23]. Другая интерпретация [24, 25] рассматривает корональную волну как результат эволюции магнитных структур, вовлеченных в процесс КВМ, в частности, сжатия плазмы на распространяющейся границе димминга, т.е. области открывающихся силовых линий магнитного поля.

К настоящему времени сложилось представление, что димминги и корональные волны, в основном, имеют квазиизотропный характер и распространяются в широком угловом секторе, более или менее симметрично относительно эруптивного центра [15, 19, 21, 22]. Вместе с тем, известно, что корональные волны испытывают отражение и рефракцию при взаимодействии с сильными магнитными полями активных областей [26], а диммингом могут быть охвачены отдельные крупномасштабные (в том числе трансэкваториальные) петли, исходящие из области эрупции [17–29]. В ряде случаев наблюдаются так называемые димминги-близнецы, когда наибольшие понижения интенсивности происходят в двух районах, примыкающих к центру эрупции и расположенных симметрично относительно линии смены полярности магнитного поля и постэруптивной аркады [15, 16]. Такие димминги-близнецы, по видимому, представляют собой основания крупномасштабной скрученной структуры, эруптирующей в процессе КВМ. Следует иметь в виду, что эруптивные события с корональными волнами и диммингами, описанные до сих пор в литературе, относятся, в основном, к 1997–1998 гг., т.е. к фазе роста активности текущего цикла, когда структура глобальной солнечной магнитосферы была сравнительно простой.

В данной работе представлены результаты анализа пространственной структуры УФ-диммингов,

наблюдавшихся вблизи максимума цикла, в условиях достаточно сложной солнечной магнитосферы. Исследование разностных гелиограмм SOHO/EIT на волне 195 Å показывает, что при наличии на диске нескольких активных областей и других образований эрупция крупного КВМ сопровождается ярко выраженными анизотропными, так называемыми каналезированными диммингами, которые развиваются вдоль узких протяженных структур (каналов) и простираются между удаленными центрами активности, в том числе по обе стороны от гелиоэкватора. В разделе 2 обсуждаются методические вопросы выделения диммингов. Раздел 3 начинается с примера квазиизотропных корональной волны и димминга, характерных для относительно простой структуры крупномасштабных магнитных полей. Затем подробно рассматриваются развитие и структура диммингов в двух событиях с КВМ типа гало в январе–феврале 2000 г. при усложненной глобальной солнечной магнитосфере. Обсуждение и заключительные замечания содержатся в разделе 4.

2. МЕТОДИЧЕСКИЕ ЗАМЕЧАНИЯ

При анализе крупномасштабной структуры диммингов целесообразно рассматривать события с КВМ типа гало, в которых источник эрупции располагается в центральной зоне видимого диска, а распространяющийся к Земле КВМ наблюдается как яркое и увеличивающееся в размерах свечение вокруг всего затмевающего экрана коронографа [30]. Использование данных на волне 195 Å обусловлено тем, что УФ-гелиограммы на телескопе SOHO/EIT именно в этой линии фиксируются с минимальным интервалом, который составляет обычно 12–20 мин [11]. Соответствующие FITS-файлы представлены в Каталоге EIT на сайте <http://umbra.nascom.nasa.gov/eit/eit-catalog.html>.

Изучение динамических солнечных явлений, происходящих на диске, в частности, таких как корональные волны и димминги, проводится путем формирования разностных изображений двух типов [15–18]. Последовательные разностные (ПР) изображения получаются, когда из каждой текущей гелиограммы вычитается предыдущая. При создании фиксированных разностных (ФР) изображений одна и та же картина диска перед событием вычитается из всех последующих гелиограмм. На таких разностных изображениях (рис. 1) димминги проявляются как темные образования пониженной интенсивности, а корональные волны видны в виде яркого распространяющегося фронта.

Необходимо иметь в виду существенные различия между ПР- и ФР-изображениями (ср. кадры

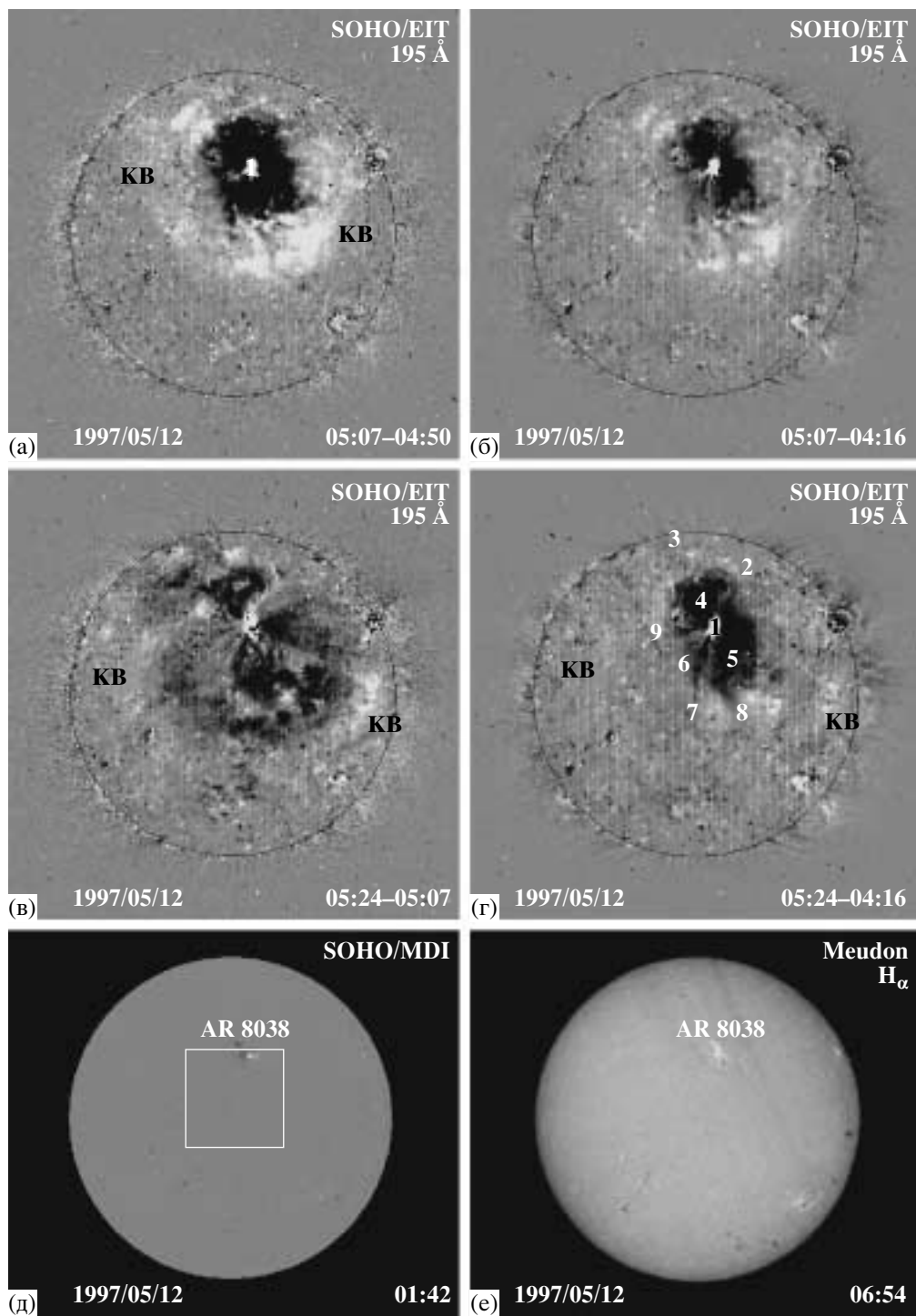


Рис. 1. Последовательные (а, в) и фиксированные (б, г) разностные изображения Солнца в линии 195 \AA (SOHO/EIT), иллюстрирующие различие между этими двумя типами изображений, а также квазинизотропный характер димминга и корональной волны (обозначенной KB) после гало-КВМ 12 мая 1997 г. Магнитограмма SOHO/MDI (д) и H_{α} -гелиограмма (е) демонстрируют наличие на диске единственной крупной активной области.

а, в и б, г на рис. 1). ПР-изображения подчеркивают изменения яркости, локализации и структуры источников, произошедшие за время между соседними кадрами. В частности, именно на них наиболее

отчетливо виден фронт распространяющейся корональной волны. Вместе с тем, на ПР-изображениях неизбежно появляется много артефактных структур. Например, в том месте, где на текущем ПР-

кадре располагался яркий перемещающийся фронт корональной волны и его фрагменты, на следующем кадре будут видны темные образования, т.е. ложные димминги методического происхождения. Аналогичный ложный димминг образуется на ПР-изображении при уменьшении интенсивности какой-либо яркой структуры, в частности, возникающей в момент вспышки или на постэруптивной фазе. С другой стороны, если глубина истинного димминга уменьшается со временем, то на следующем ПР-кадре на этом месте появится артефактное уярчение. Если же интенсивность настоящего уярчения или димминга на временном отрезке между соседними кадрами остается более или менее неизменной, то соответствующая структура на ПР-изображении будет вообще отсутствовать (иметь фоновую интенсивность). Указанные разновидности артефактных структур можно обнаружить при внимательном рассмотрении ПР-изображений, показанных на рис. 1а,в. В частности, многие уярчения и потемнения, заметные за фронтом корональной волны на кадрах а,в рис. 1 имеют методическое происхождение и обусловлены процедурой получения ПР-изображений.

На ФР-изображениях (рис. 1б,г) изменения, произошедшие в ходе события, в том числе корональные волны и димминги, видны явно (естественно, имеются в виду изменения относительно выбранного базового кадра до события). Однако, при формировании ФР-изображений возникает проблема, связанная с вращением Солнца, которое также может приводить к образованию артефактных структур. При размере пиксела $5.24''$ на кадре SOHO/EIT [11] формата 512×512 эффект вращения почти не заметен на ПР-изображениях, получаемых путем вычитания изображений, разделенных временным интервалом 12–20 мин. Но вращение солнечной поверхности становится существенным, когда интервал между используемыми кадрами составляет десятки минут или несколько часов, как это имеет место при построении ФР-изображений. Понятно, в частности, что из-за углового смещения темного образования, наблюдаемого в поглощении, на разностном изображении к востоку от него появится артефактная яркая кромка. В случае яркой структуры, наблюдаемой в излучении, наоборот, возникнет темная восточная кромка, которая будет выглядеть как димминг. Особенно это сказывается на узких образованиях, вытянутых в меридиональном направлении, например, на вертикальных волокнах и трансэкваториальных петлях, когда долготная протяженность артефактной кромки может быть сравнима с размером самого образования. Чтобы артефактные структуры не появлялись, перед формированием разностных изображений нами осуществлялась компенсация вращения Солнца, а

также совмещение гелиограмм и приведение их к единой калибровке. Как правило, все рассматриваемые кадры приводились ко времени той же базовой гелиограммы перед событием, которая вычиталась из последующих кадров при формировании ФР-изображений. Например, на рис. 1б,г — это 04:16 UT.

Таким образом, в данной работе анализ диммингов производился именно по ФР-изображениям с предварительной компенсацией вращения Солнца. ПР-изображения использовались в качестве дополнительной информации при более детальном рассмотрении тех или иных изменений, присутствующих на ФР-гелиограммах. При этом наиболее эффективным инструментом анализа и представления данных являются компьютерные фильмы, состоящие из разностных изображений и демонстрируемые в JAVA-формате с регулируемой частотой кадров и направлением их просмотра. Примеры таких фильмов, а также другие иллюстрации, в частности, КВМ, относящиеся к рассматриваемым событиям, можно найти на сайте <http://helios.izmiran.troitsk.ru/lars/Chertok/dimming/index.html>.

Следует обратить внимание на еще один важный момент. Анализируемые здесь димминги, особенно отдельные фрагменты их крупномасштабной структуры, а также многие корональные волны — это сравнительно слабые явления (см. ниже). По этой причине, чтобы сделать их достаточно отчетливыми, в разностных изображениях ограничен диапазон интенсивностей. При этом наиболее яркие источники, в частности, возникающие во время вспышек, которые в данном случае не являются предметом анализа, оказываются в насыщении. Аналогичный подход использовался при выделении крупномасштабных светящихся цепочек на микроволновых, УФ- и рентгеновских гелиограммах [31]. Например, уровни ограничения яркости ПР- и ФР-изображений, представленных на рис. 1, составляют ± 75 и ± 150 отсч./пик., соответственно. Примерно такой же диапазон интенсивностей использовался и для других рассматриваемых событий. Естественно, общий вид и некоторые детали структуры диммингов и корональных волн несколько меняются в зависимости от выбранного диапазона интенсивностей.

Заметим в заключение, что при значительном временном интервале между текущими и базовой гелиограммами на высокочувствительных ФР-изображениях проявляются регулярные вертикальные полосы, имеющие инструментальное происхождение (рис. 1г).

На изображениях SOHO/EIT нередко видны периодические вертикальные и горизонтальные светлые полосы, обусловленные свойствами

ПЗС-матрицы [11]. Поворот изображения Солнца не изменяет положения горизонтальных полос, но приводит к смещению вертикальных полос. Поэтому при вычитании изображений горизонтальные полосы подавляются, а вертикальные усиливаются. Поскольку вращение производится только для сферической поверхности, этот инструментально-методический эффект, подчеркнутый ограничением интенсивности, присутствует только на солнечном диске.

3. АНАЛИЗ КОНКРЕТНЫХ СОБЫТИЙ

3.1. Событие 12 мая 1997 г.

Для данного события мы ограничимся краткими замечаниями, поскольку оно широко известно и подробно описано в литературе [15, 17, 32, 33]. В настоящей статье оно представлено как иллюстрация связанных с КВМ возмущений, происходящих в условиях сравнительно простой глобальной солнечной магнитосферы, а относящийся к нему рис. 1 уже использовался в разделе 2 при обсуждении методики анализа.

Источник эрупции располагался в активной области AR 8038 (N21 W09), которая в это время была практически единственной на всем солнечном диске. Об этом свидетельствуют магнитограмма SOHO/MDI и H_{α} -гелиограмма Парижской обсерватории, показанные на рис. 1д,е. Из других значительных структур на диске присутствовали лишь северная и южная полярные корональные дыры (КД), видимые в мягком рентгеновском диапазоне при помощи телескопа Yohkoh/SXT, а также на оригинальных УФ-гелиограммах в линиях 195 и 284 Å [15]. Рассматриваемое событие было связано с длительной вспышкой балла 1F/C1.3 с максимумом около 04:50 UT. КВМ, зарегистрированный на коронографе SOHO/LASCO, классифицировался как полное гало со свечением вокруг всего затмевающего диска, но обладал наибольшей яркостью над восточным и западным, а также северным секторами лимба [32].

Эрупция КВМ сопровождалась отчетливыми крупномасштабными транзиентными возмущениями на диске, в частности, корональной волной и диммингами [13]. Из разностных гелиограмм на волне 195 Å (рис. 1) видно, что фронт корональной волны имел фрагментарную структуру, но распространялся более или менее изотропно относительно центра эрупции 1. Лишь при подходе к южной границе северной полярной КД фронт корональной волны приостановил свое движение, а его взаимодействие с КД привело к возникновению протяженной светящейся цепочки 2-3 (рис. 1г), которая постепенно охватила всю границу КД и

наблюдалась в течение нескольких часов. Согласно [15], до момента взаимодействия с КД скорость корональной волны вдоль солнечной поверхности во всех направлениях была примерно одинаковой и составляла 240 км/с. Сравнимую скорость в картинной плоскости имел и гало-КВМ [32].

Два наиболее глубокие, сходных по размерам и форме, симметричных димминга-близнеца 4, 5 образовались к северо-востоку и юго-западу от центра эрупции и были хорошо видны, по крайней мере, в трех УФ-линиях 171, 195 и 284 Å, а также в мягком рентгене [15]. Существенно, что на протяжении всего события эти интенсивные димминги были окружены гораздо более слабой областью димминга, которая занимала все пространство между диммингами 4, 5 и распространяющейся квазиизотропной корональной волной. Следовательно, область слабого димминга также была квазиизотропной. Она заметна, в частности, на двух ФР-изображениях (рис. 1б, 1г), но лучше всего выделена на рис. 5с в статье [17].

Таким образом, можно констатировать, что в данном случае и корональная волна, и димминги были, в целом, квазиизотропными и охватывали почти всю видимую полусферу. Вероятно, такой характер транзиентных возмущений стал возможным благодаря тому, что на диске в это время присутствовала лишь одна активная область и, следовательно, структура солнечной магнитосферы была достаточно простой. Во всяком случае, как показано ниже, в более сложных условиях наблюдаемые димминги становятся существенно анизотропными и приобретают форму протяженных, узких структур (каналов). Заметим, что некоторые признаки таких каналов можно обнаружить и в рассматриваемом событии: имеются в виду небольшие по протяженности димминговые ответвления 1-6-7, 6-8, 1-9 на рис. 1г.

3.2. Событие 18 января 2000 г.

Это событие произошло, когда на диске наблюдалось несколько активных центров, волокон, КД (рис. 2д, 2е), и, следовательно, структура глобальной солнечной магнитосферы была достаточно сложной. Событие включало в себя, в частности, длительную вспышку балла 1N/M3.9 с максимумом в 17:27 UT в области AR 8831 (S19 E11) и структурированный КВМ типа гало, который сначала развивался над восточным лимбом и затем охватил все позиционные углы.

Из ФР-изображений на волне 195 Å относительно гелиограммы 16:48 UT, приведенных на рис. 2а-2г, видно, что уже к 17:24 UT (рис. 2а), кроме кольцеобразного димминга вокруг эруптивного центра 1, возникла узкая трансэваториальная

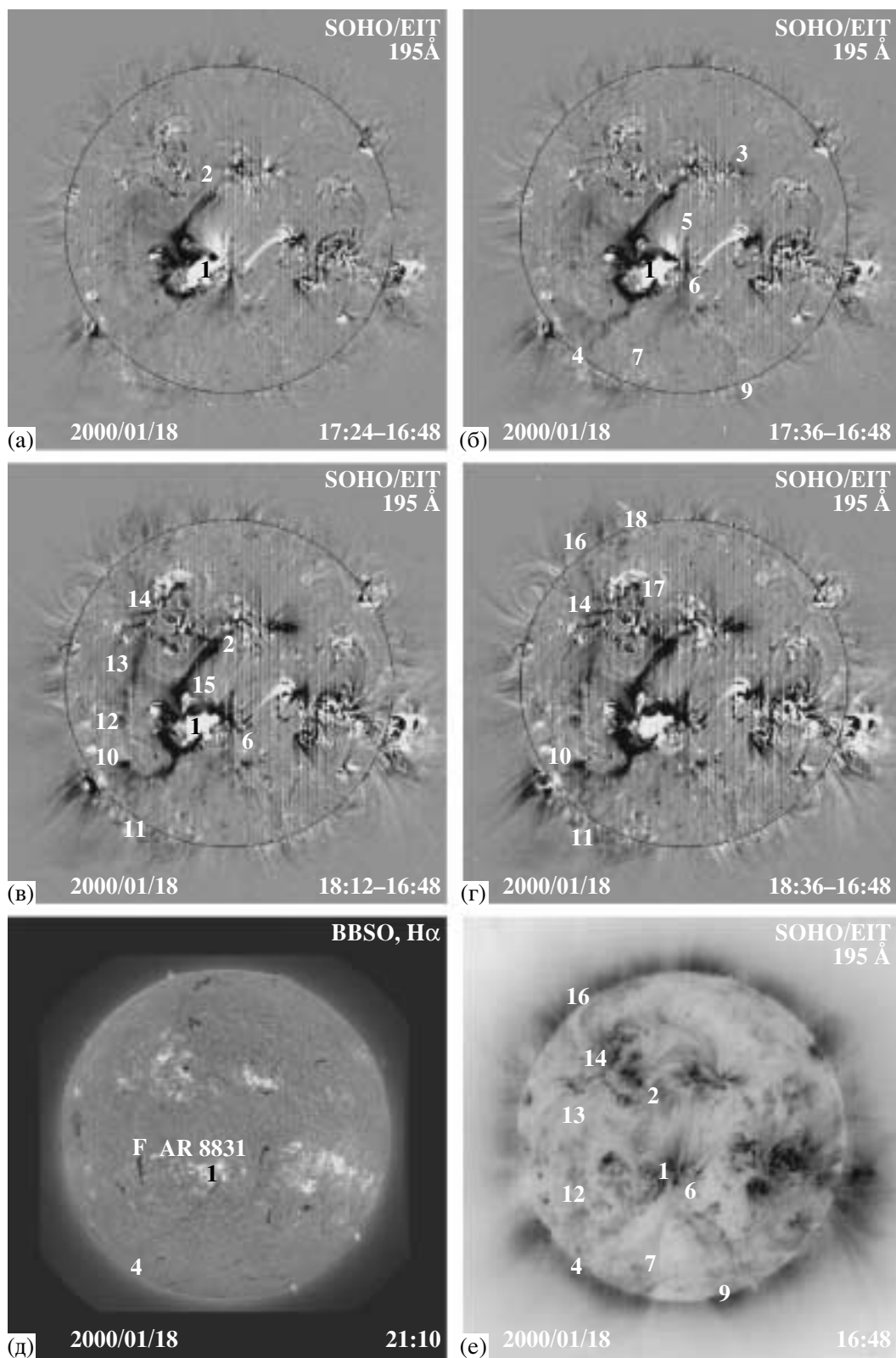


Рис. 2. (a–г) — Фиксированные разностные изображения Солнца за 18 января 2000 г. в линии 195 \AA (SOHO/EIT) относительно вычитаемой гелиограммы 16:48 UT, иллюстрирующие развитие канализированных диммингов в связи с гало-КВМ при наличии на диске нескольких центров активности. В нижнем ряду приведены гелиограмма в линии H_{α} (д) и исходное фоновое изображение (негатив) на волне 195 \AA (е).

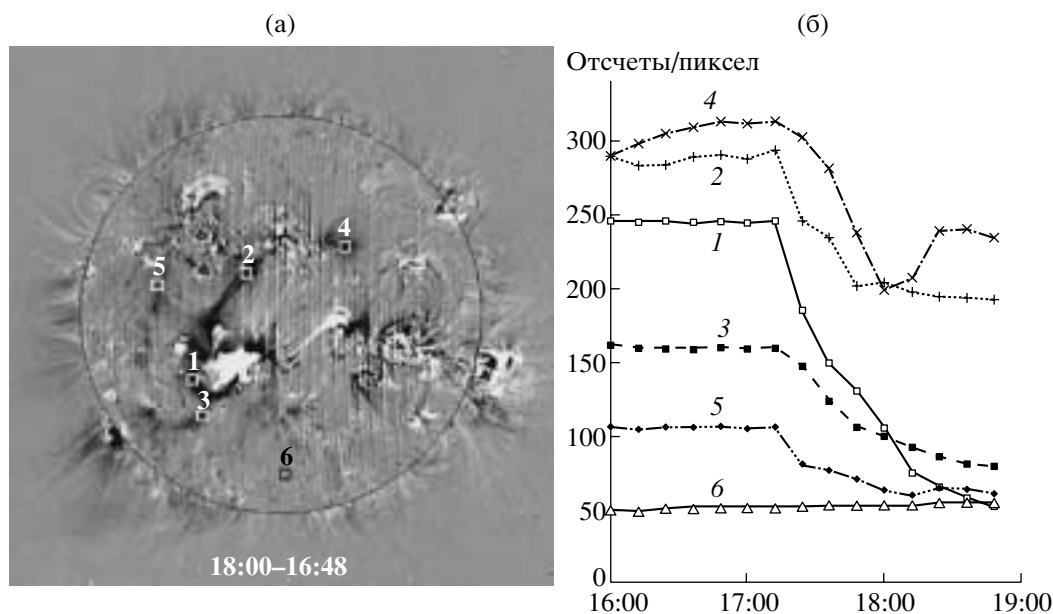


Рис. 3. Временной ход интенсивности излучения в событии 18 января 2000 г. в линии 195 \AA (б) для ряда площадок $53'' \times 53''$ (а) в канализированных диммингах (1–5), а также внутри южной корональной дыры (6). Инструментальный фон вычтен.

полоса димминга, простирающаяся к области 2, расположенной в северной половине диска вблизи центрального меридиана. Следующий кадр в 17:36 UT (рис. 2б) указывает на дальнейшее развитие этой полосы в западном направлении, к точке 3. Становится видимым также канал димминга 1–4, идущий от эруптивного центра к юго-восточному лимбу. К западу от AR 8831 формируется относительно слабая ветвь димминга 5–6–7, которая посредством уярчившейся петли 6–8 соединена с юго-западной областью, где проявляется еще один удаленный очаг димминга. Слабый димминг 6–9 простирается в район южного лимба.

На последующих кадрах, в частности, в 18:12 UT (рис. 2в), хорошо видна юго-восточная петля димминга 1–10 с возможным продолжением к лимбу 11. Кроме того, выделяется еще одна, восточная трансэкваториальная димминговая структура 12–13–14, идущая к активной области, расположенной в северо-восточном квадранте. Основные восточная и западная трансэкваториальные ветви димминга соединены между собой дополнительными димминговыми структурами: одна или две узкие полосы димминга 2–14 проходят вблизи центрального и северо-восточного комплексов активности северного полушария (причем эти полосы имеют продолжение из района 14 в виде узких отростков в восточном и юго-восточном направлениях); другая, более диффузная, возможно, петлеобразная система диммингов 13–15 располагается вблизи центрального меридиана и смыкается с ярким дим-

мингом 15–6, который окаймляет эруптивный центр с севера и северо-запада.

Практически все перечисленные элементы канализированных диммингов присутствуют и на последнем из приведенных кадров в 18:36 UT (рис. 2г). Дополнительно здесь можно отметить появление относительно слабых диммингов 14–16 и 17–18, простирающихся к северо-восточному лимбу. Виден также узкий димминг 10–11, идущий от юго-восточной димминговой петли в южном направлении.

Об относительной глубине и временном ходе различных участков канализированных диммингов можно судить по рис. 3. На гелиограмме (рис. 3а) указан ряд выбранных площадок размером $53'' \times 53''$ в различных структурах диммингов (1–5), а также для контроля в районе южной КД (6). Из соответствующих временных профилей, показанных на рис. 3б, следует, что понижение интенсивности в основных диммингах, как прилегающих к эруптивному центру, так и имеющих форму каналов, составляет 25–80%. В площадке 4 после сравнительно кратковременного глубокого димминга виден некоторый подъем интенсивности. Кривая 6 подтверждает, что димминг не затрагивает южную полярную КД. Судя по рис. 3б, время развития диммингов, в том числе и канализированных, измеряется несколькими десятками минут. Полное время существования канализированных диммингов может достигать нескольких часов.

Что касается отождествления описанных крупномасштабных канализированных диммингов с

наблюдаемыми корональными и фотосферными структурами, то сопоставление разностных изображений на рис. 2а–г с H_{α} -гелиограммой (рис. 2д) и исходным фоновым изображением (негатив) на волне 195 Å (рис. 2е) позволяет заметить следующее. Два основных трансэкваториальных канала диммингов 1-2 и 12-13-14, по-видимому, совпадают с петлеобразными трансэкваториальными структурами, наблюдаемыми в линии 195 Å и обозначенными этими же цифрами на рис. 2е. Наряду с этим, в анализируемом событии димминг 1-4 соответствует каналу юго-восточного H_{α} -волока (рис. 2д), а димминги 6-7, 6-9 и 14-16 располагаются вдоль западной и восточной границ южной полярной КД и западной границы северо-восточной КД, соответственно. Следует заметить, что H_{α} -волоко F (рис. 2д), ближайшее к центру эрупции и окруженное каналами диммингов, не проявило явных признаков возмущения в связи с данным эруптивным событием.

Характерно, что в данном событии сколь-нибудь протяженный яркий фронт корональной волны в обычном понимании не виден ни на ФР-, ни на ПР-фильмах, ни тем более на соответствующих изображениях. Вместо этого наблюдается то, что можно назвать волной димминга: увеличение со временем протяженности отдельных димминговых каналов и общего пространства, охваченного диммингами. При этом немногочисленные нерегулярные, транзиентные уярчения небольшой площади и интенсивности примыкают к димминговым структурам. Согласно оценкам, которые можно сделать при значительном интервале между имеющимися кадрами, скорость распространения такой волны димминга, как и в классических ярких корональных волнах (см. раздел 3.1), составляла несколько сотен км/с. Существенно, что в данном событии волна димминга распространялась от эруптивного центра, в основном, в восточном, северном и южном направлениях, но практически не пересекала центральный меридиан, т.е. не была сферически-симметричной.

3.3. Событие 17 февраля 2000 г.

Данное событие, помимо прочего, представляет интерес еще и с той точки зрения, что оно имело место через оборот примерно на том же участке солнечной поверхности, что и предыдущее событие (раздел 3.2), при такой же сложной глобальной солнечной магнитосфере. Оно развивалось на фоне двух симпатических вспышек балла M2.5/1B и M1.3/2N, которые произошли в соседних активных областях южной полусферы AR 8869 и AR 8872 (S25 W16 и S29 E07; рис. 4д) и достигли максимума в мягком рентгене в 18:52 и 20:35 UT,

соответственно. Ряд аргументов, основанных на анализе оптических, магнитных, УФ- и рентгеновских данных, в пользу того, что первая вспышка инициировала вторую, а две активные области были связаны между собой магнитными структурами, приведен в [34]. Кольцеобразная трансэкваториальная система светящихся цепочек 1-5-3-7-8-9-10-6, которую можно видеть на обработанной гелиограмме SOHO/EIT на волне 195 Å (рис. 4е; негатив), демонстрирует, что эта связь носила глобальный характер и охватывала все активные области, локализованные в центральном секторе диска [31]. По данным коронографа SOHO/LASCO, первые проявления КВМ наблюдались над юго-западным лимбом в 19:31 UT, а после 20:06 UT вокруг всего затмевающего диска развивался симметричный КВМ типа гало. Такая симметричная конфигурация КВМ, возможно, отражает тот факт, что в процесс эрупции, как показано ниже, был вовлечен аналогичный по форме кругообразный центральный сектор диска, визуализируемый упоминавшейся цепочкой 1-5-3-7-8-9-10-6, а также системой каналезированных диммингов, которые видны на ФР-изображениях (рис. 4а–4г) и соответствующих фильмах.

В ходе первой вспышки связь между областями AR 8869 и AR 8872 обозначилась двумя димминговыми структурами (рис. 4а). Одна из них была сравнительно широкой, соединяла западную оконечность димминга 1, вспышечное уярчение 2, восточную область 3 и имела продолжение в юго-восточном направлении в виде узкого канала 3-4. Другая представляла собой узкую дугу 1-5-3 и огибала область вспышки с юга. Кроме того, на этой стадии слабым диммингом была охвачена вся центральная зона диска между областями 2, 3, 7, 8, 9, 10, 6. На его фоне выделялись несколько более глубокие, но все же слабые трансэкваториальные димминговые каналы 1-9, 3-9, 6-10. Более отчетливо каналы 1-9, 6-10, как и димминги 7-8, 8-9, видны на поздней стадии первой вспышки (рис. 4б). К этому времени вспышечное уярчение 2 увеличило свою долготную протяженность, в районе 3 появились первые признаки второй вспышки, широкий димминг 2-3 между взаимодействующими активными областями почти пропал, но стал более заметным канал 2-11, соединяющий уярчение 2 и южный дугообразный димминг 1-5-3.

Вторая вспышка сопровождалась появлением новых диммингов вокруг яркой структуры 3 (рис. 4в). К северо-востоку и к югу от нее сформировались петлеобразные системы диммингов 12 и 13. Последняя своим западным основанием опиралась на район 11, через который проходили также узкий канал от первой вспышки 2 и усилившаяся восточная ветвь 3-5 дугообразного димминга 1-5-3. Ярко

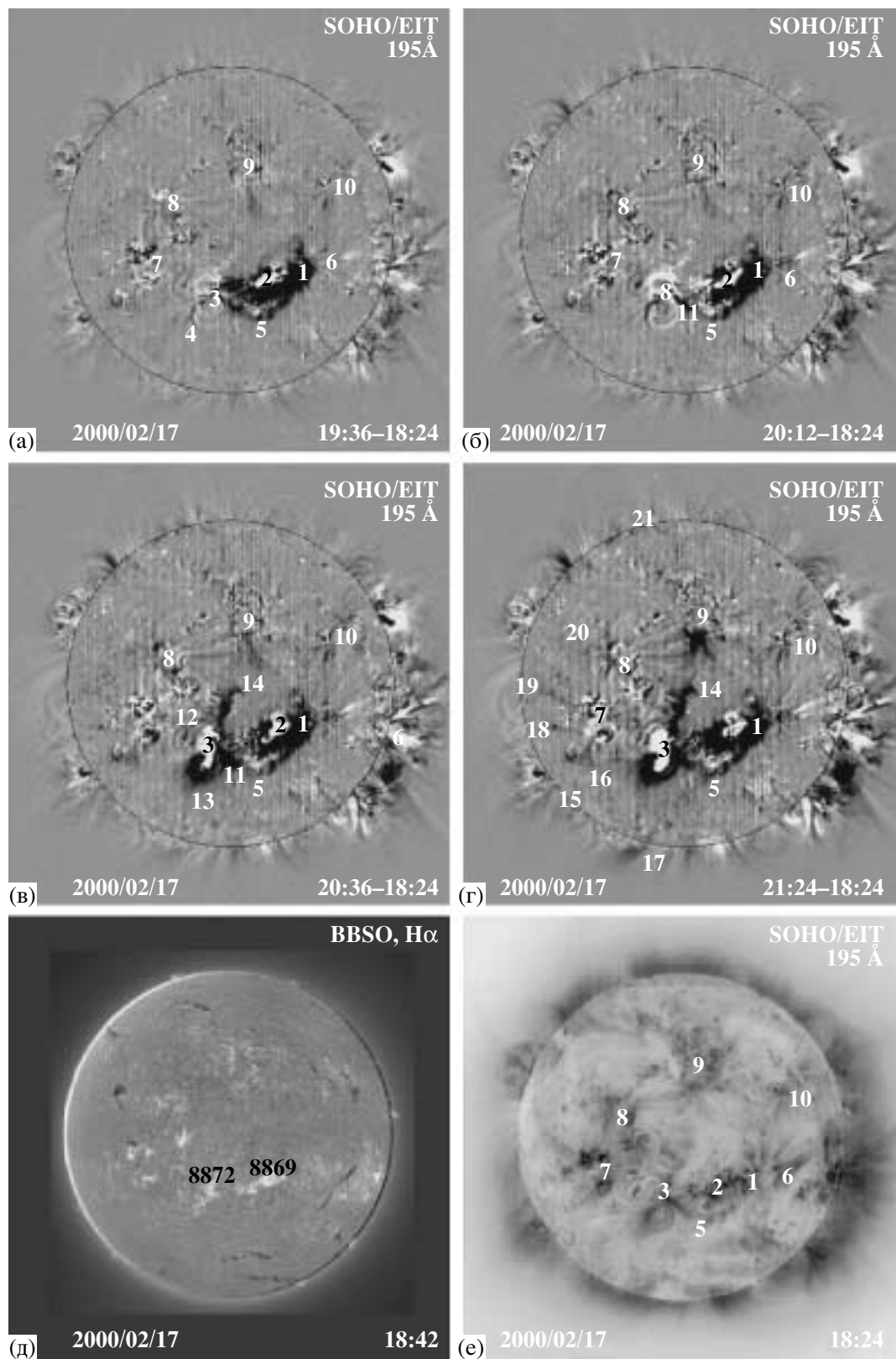


Рис. 4. (а–г)— Фиксированные разностные изображения за 17 февраля 2000 г. на волне 195 Å (SOHO/EIT) относительно вычитаемой гелиограммы 18:24 UT, иллюстрирующие развитие канализированных диммингов после гало-КВМ и двух симпатических вспышек. В нижнем ряду приведены гелиограмма в линии H α (д) и исходное фоновое изображение (негатив) в линии 195 Å (е).

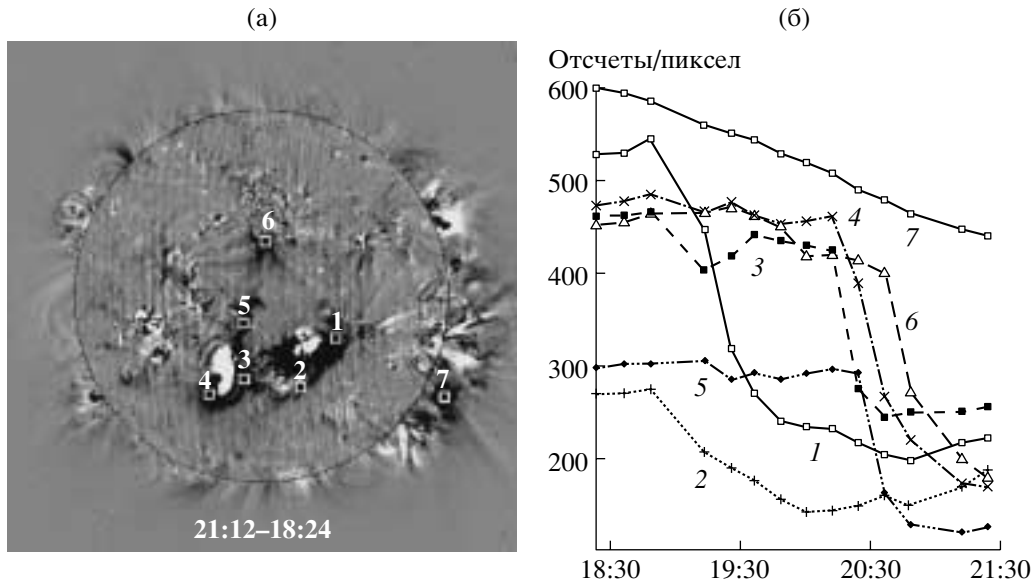


Рис. 5. Временной ход интенсивности излучения в событии 17 февраля 2000 г. в линии 195 \AA (б) для ряда площадок $53'' \times 53''$ (а) в диммингах (1,3,4), примыкающих к вспышечным центрам, и в канализированных диммингах (2, 5, 6). Для сравнения и контроля показан ход интенсивности в области 7 над юго-западным лимбом. Инструментальный фон вычтен.

выраженный канал димминга 3-14 с несколькими ответвлениями сформировался к северу от области вспышки, в направлении области 9. Заметно усилились многие канализированные димминги, локализованные внутри центральной зоны диска, в частности, между областями 3-8, 8-9, 1-9, 1-10. Все указанные димминговые структуры получили дальнейшее развитие на заключительной стадии события (рис. 4г). В частности, стало очевидным продолжение наиболее яркого трансэкваториального канала 3-14 к области 9. Глубина диммингов, расположенных к югу от этой области, а также простирающихся к восточной области 8, заметно увеличилась. Проявились димминги, идущие от второго вспышечного уярчения 3 к юго-восточному лимбу 15 (с ответвлением из точки 16 к области 7), а также к южному лимбу 17, где глубокий очаг димминга виден за пределами солнечного диска. Сюда же через западную часть дугообразного канала 1-5 простирается димминг 5-17 из области первой вспышки. Формирование канализированных диммингов происходило к востоку от областей 7, 8 и достигло точек 18, 19, 20. Узкие диммиги видны также между областями 1, 10 и 7, 8. Фрагменты диммингов обнаруживаются между областью 9 и северным лимбом 21.

Кривые, характеризующие развитие и глубину диммингов в нескольких ключевых площадках размером $53'' \times 53''$, представлены на рис. 5. Хорошо виден временной сдвиг между возникновением диммингов, связанных с первой и второй вспышками. Первая вспышка сопровождалась началом

диммингов около 19 UT в площадках 1, 2 и частично 3. Со вторым вспышечным событием связаны существенные димминги, которые начались в 20:20–20:40 UT в площадках 5, 6, относящихся к меридиональному каналу, а также в южной площадке 4 и повторно в площадке 3. При этом начало димминга в северной площадке 6 происходило с заметным запаздыванием. Кривая 7, показанная для сравнения и контроля, демонстрирует, что в области над юго-западным лимбом происходило плавное уменьшение интенсивности, которое, по-видимому, не было связано с рассматриваемыми диммингами. Как и в предыдущем событии, глубина основных и канализированных диммингов составляет десятки процентов при времени развития несколько десятков минут.

Насколько позволяет судить сопоставление описанных диммингов (рис. 4а–4г) и фоновой гелиограммы на волне 195 \AA (рис. 4е; негатив), расположение и конфигурация большинства канализированных диммингов соответствуют элементам кольцеобразной системы светящихся цепочек 1-5-3-8-9-10-6, которая наблюдалась до события в центральном секторе диска. При этом наиболее глубокие димминги возникали как раз там, где УФ-структуры до события были наиболее яркими. Например, южный дугообразный канал димминга 1-5-3 совпал с соответствующей яркой цепочкой между двумя вспышечными областями. Наиболее глубокие отрезки трансэкваториального димминга 3-9 и примыкающие ответвления отождествляются со структурами повышенной интенсивности в

окрестностях южной и северной активных областей. Диагональный димминг 1-9, а также восточный и западный меридиональные димминги 7-8 и 1-10 располагались на месте соответствующих УФ-эмиссионных структур. Отмеченные выше димминговые фрагменты, локализованные вне центральной зоны и простирающиеся к югу от вспыхивающих областей 2, 3, к востоку от областей 7, 8 и к северу от области 9 также имели на фоновой гелиограмме соответствующие аналоги в виде структур повышенной интенсивности.

Из приведенных материалов очевидно, что, как и в предыдущем случае, возмущения, связанные с рассматриваемым КВМ типа гало, имели глобальный характер и были анизотропными. Это относится не только к диммингам, но и к корональной волне. Как показывает анализ фильмов, сформированных из ФР- и ПР-изображений, некоторые проявления корональной волны вместе с распространяющимися диммингами обнаруживаются лишь в пределах южного сектора, ограниченного элементами 3-16-15 и 5-17 (рис. 4г). Помимо этого, незначительные по размерам фрагментарные уярчения сопровождали развитие трансэкваториальных диммингов 1-9, 3-9 в центральной зоне диска.

4. ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ разностных УФ-гелиограмм (главным образом, ФР-изображений) SOHO/EIT на волне 195 Å дает основания говорить о следующих свойствах крупномасштабных солнечных диммингов, а также корональных волн, связанных с КВМ типа гало:

- известны события, в которых наблюдаются изотропные димминги и корональные волны, развивающиеся более или менее симметрично во все стороны от эруптивного центра [15, 17];

- в данной работе обнаружены события, в которых имеют место ярко выраженные анизотропные димминги, локализованные вдоль ряда узких протяженных структур — каналов;

- такие каналлизированные димминги простираются между удаленными центрами активности, в том числе по обе стороны от гелиоэкватора, и охватывают почти весь видимый диск Солнца, т.е. носят характер глобальных возмущений;

- понижение интенсивности крайнего УФ-излучения во многих димминговых каналах сравнимо с изотропными диммингами и достигает нескольких десятков процентов;

- как и димминговые элементы вокруг эруптивного центра, каналлизированные димминги развиваются в течение нескольких десятков минут и могут существовать на протяжении нескольких часов;

- в событиях с каналлизированными диммингами яркие корональные волны или совсем не наблюдаются, или тоже являются анизотропными и распространяются в ограниченном секторе диска. Иногда вместо яркой корональной волны видна волна темных диммингов;

- согласно оценкам, которые удается сделать по имеющимся данным, скорость распространения каналлизированных диммингов, как и корональных волн, составляет несколько сотен км/с;

- появление изотропных или каналлизированных диммингов, по-видимому, определяется степенью сложности глобальной солнечной магнитосферы;

- изотропные димминги и корональные волны наблюдаются при простой структуре крупномасштабных магнитных полей, когда на диске присутствует только один центр активности;

- каналлизированные димминги и анизотропные корональные волны, напротив, характерны для сложной структуры глобальной солнечной магнитосферы, при наличии на диске нескольких активных областей, волокон, корональных дыр и т.д.

Относительно отождествления димминговых каналов с корональными структурами в настоящее время можно сделать только самые предварительные замечания. Очевидно, что каналлизированные димминги очерчивают или огибают существенные крупномасштабные корональные структуры. Некоторые каналы диммингов, по-видимому, совпадают с существовавшими до КВМ петлеобразными трансэкваториальными эмиссионными структурами, которые наблюдаются в той же линии 195 Å между удаленными активными областями. Аналогичное понижение интенсивности трансэкваториальных рентгеновских и УФ-петель в связи с гало-КВМ отмечено в [27] (см. также [22, 28, 29]). Имеются каналлизированные димминги, которые возникают на месте крупномасштабных светящихся УФ-цепочек [31]. Такие каналлизированные димминги, вероятно, можно рассматривать как транзитные цепочки в поглощении. Протяженные димминги могут располагаться и вдоль канала H_{α} -волокна. Подобно тому, как корональные волны избегают активных областей [26] и останавливаются перед КД [15], каналлизированные димминги не проникают внутрь КД, а локализуются вдоль их границ.

Обнаруженные каналлизированные димминги — еще одно свидетельство того, что удаленные активные области и другие структуры, в том числе расположенные в разных полусферах Солнца, связаны между собой в единую сложную систему и формируют глобальную солнечную магнитосферу. Об этом же свидетельствуют и крупномасштабные эмиссионные цепочки, часть которых, по-видимому, высвечивает квазисепаратрисные слои,

возникающие между разными магнитными потоками в глобальной солнечной магнитосфере, взаимодействующих друг с другом [31].

Наблюдения ясно показывают, что во время большого КВМ в процесс эрупции за время порядка нескольких десятков минут оказывается вовлеченной значительная часть глобальной солнечной магнитосферы. В первую очередь, в этот процесс, вероятно, включаются структуры, которые имеют прямую магнитную связь с эруптивным центром [29]. Не исключено также, что это происходит под действием МГД-возмущения, распространяющегося от эруптивного центра и отождествляемого с корональной волной.

Очевидно, что наиболее глубоким диммингам подвергаются те структуры, которые до эрупции обладали достаточно большой мерой эмиссии и были источниками повышенного излучения. Димминги и димминговые каналы демонстрируют, что в сложной глобальной солнечной магнитосфере существуют выделенные корональные образования и протяженные структуры, в которых в связи с КВМ в наибольшей степени происходят понижение интенсивности излучения. Такое понижение может быть следствием частичного или полного открывания магнитных силовых линий в процессе КВМ и соответствующей эвакуации вещества. Другая возможность — воздействие на эти структуры первоначально изотропного МГД-возмущения. Вероятно, в конкретных событиях или в отдельных районах глобальной солнечной магнитосферы оба эти фактора, т.е. открытие силовых линий и МГД-возмущение, могут преобладать или действовать совместно.

В целом, можно сделать вывод, что каналлизированные димминги являются важным следствием и индикатором тех значительных возмущений и существенной перестройки крупномасштабных структур глобальной солнечной магнитосферы, которые имеют место в короне во время и после эрупции КВМ. Более полные представления о природе каналлизированных диммингов и их роли в КВМ должны быть получены в ходе дальнейшего анализа.

Авторы благодарны коллективам SOHO EIT и LASCO, а также коллективам Обсерватории Биг Бэр и Медонской обсерватории за данные, использованные при анализе. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 00-15-96661, 00-15-96710, 00-02-16090, 00-02-16819), а также при частичной поддержке Минпромнауки РФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. И. М. Черток, *Астрон. журн.* **70**, 165 (1993).
2. A. J. Hundhausen, in *The Many Faces of the Sun*, Ed. by K. Strong et al. (Springer-Verlag, New York, 1999), p. 143.
3. D. F. Webb, *J. Atmosph. and Solar-Terr. Phys.* **62**, 1415 (2000).
4. M. D. Andrews and R. A. Howard, *Space Sci. Rev.* **95**, 147 (2001).
5. H. S. Hudson and E. W. Cliver, *J. Geophys. Res.* **106**, 25199 (2001).
6. J. A. Klimchuk, in *Space Weather, Geophysical Monograph, № 125*, Ed. by P. Song, H. Singer, and G. Siscoe (AGU, Washington, 2001), p. 143.
7. Y. Ogawara, T. Takano, T. Kato *et al.*, *Solar Phys.* **136**, 1 (1991).
8. V. Domongo, B. Fleck, A. I. Poland, *et al.*, *Solar Phys.* **162**, 1 (1995).
9. G. E. Brueckner, R. A. Howard, M. J. Koomen, *et al.*, *Solar Phys.* **162**, 357 (1995).
10. S. Tsuneta, L. Acton, M. Bruner, *et al.*, *Solar Phys.* **136**, 37 (1991).
11. J.-P. Delaboudinière, G. E. Artzner, J. Brunaud, *et al.*, *Solar Phys.* **162**, 291 (1995).
12. D. M. Rust, *Space Sci. Rev.* **34**, 21 (1983).
13. A. C. Sterling and H. S. Hudson, *Astrophys. J.* **491**, L55 (1997).
14. H. S. Hudson and D. F. Webb, in *Coronal Mass Ejections*, Ed by N. Crooker, J. Joselyn, and J. Feynman, AGU Geophysical Monograph Series, **No. 99**, 27 (1997).
15. B. J. Thompson, S. P. Plunkett, J. B. Gurman, *et al.*, *Geophys. Res. Lett.* **25**, 2465 (1998).
16. D. M. Zarro, A. C. Sterling, B. J. Thompson, *et al.*, *Astrophys. J.* **520**, L139 (1999).
17. N. Gopalswamy and B. J. Thompson, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* **62**, 1427 (2000).
18. B. J. Thompson, J. B. Gurman, W. M. Neupert, *et al.*, *Astrophys. J.* **517**, L151 (1999).
19. A. Klassen, H. Aurass, G. Mann, *et al.*, *Astron. and Astrophys.* **141**, 357 (2000).
20. D. A. Biesecker, D. C. Myers, B. J. Thompson, *et al.*, *Astrophys. J.* **569**, 1009 (2002).
21. B. J. Thompson, B. Reynolds, H. Aurass, *et al.*, *Solar Phys.* **193**, 161 (2000).
22. A. Warmuth, B. Vršnak, H. Aurass, *et al.*, *Astrophys. J.* **560**, L105 (2001).
23. G. E. Moreton and H. E. Ramsey, *PASP* **72**, 357 (1960).
24. C. Delannée and G. Aulanier, *Solar Phys.* **190**, 107 (1999).
25. C. Delannée, *Astrophys. J.* **545**, 512 (2001).
26. L. Ofman and B. J. Thompson, *Astrophys. J.* **574**, 440 (2002).
27. J. I. Khan and H. S. Hudson, *Geophys. Res. Lett.* **27**, 1083 (2000).
28. S. Pohjolainen, D. Maia, M. Pick, *et al.*, *Astrophys. J.* **556**, 421 (2001).
29. T. Wang, Y. Yan, J. Wang, *et al.*, *Astrophys. J.* **572**, 580 (2002).

30. G. E. Brueckner, J.-P. Delaboudinière, R. A. Howard, *et al.*, Geophys. Res. Lett. **25**, 3019, 1998.
31. I. M. Chertok, Solar Phys. **198**, 367 (2001).
32. S. P. Plunkett, B. J. Thompson, R. A. Howard, *et al.*, Geophys. Res. Lett. **25**, 2477 (1998).
33. D. F. Webb, R. P. Lepping, L. Burlaga, *et al.*, J. Geophys. Res. **105**, 27251 (2000).
34. H. Wang, V. Yurchyshyn, J. Chae, *et al.*, Astrophys. J. **559**, 1171 (2001).

SOLAR LARGE-SCALE CHANNEL-LIKE DIM REGIONS PRODUCED BY CORONAL MASS EJECTIONS

I. M. Chertok and V. V. Grechnev

A new type of dimming, or transient coronal hole (i.e., region of reduced soft-X-ray and EUV emission) is revealed in analyses of digital solar images obtained with the SOHO/EIT UV telescope at 195 Å. Such features can be observed on the solar disk after halo-type coronal mass ejections (CMEs). If several active regions, filaments, and other structures are present on the disk during a major eruptive event, strongly anisotropic, channel-like regions of decreased brightness coexist with relatively compact dim regions adjacent to the eruptive center. The two types of dim region have comparable contrasts, but the channel-like regions stretch along several narrow, extended structures (channels), and can nearly entirely span the visible disk. As this occurs, anisotropy is also characteristic of coronal waves, which appear as fronts of enhanced brightness traveling ahead of the dim regions in some halo-CME events. It is argued that such transient phenomena are closely related to the strong disturbance and restructuring of the large-scale magnetic fields involved in the CME; the channel-like character of the dim regions reflects the global complexity of the solar magnetosphere, especially near solar-activity maximum.