

УДК 523.945-46

КРУПНОМАСШТАБНЫЕ “ДИММИНГИ”, ВЫЗЫВАЕМЫЕ КОРОНАЛЬНЫМИ ВЫБРОСАМИ МАССЫ НА СОЛНЦЕ, ПО ДАННЫМ SOHO/EIT В ЧЕТЫРЕХ ЛИНИЯХ КРАЙНЕГО УФ-ДИАПАЗОНА

© 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 26.03.2003 г.; принята в печать 08.05.2003 г.

Димминги, или транзиентные корональные дыры (области пониженной интенсивности мягкого рентгеновского и крайнего ультрафиолетового излучения), которые наблюдаются на солнечном диске после корональных выбросов массы (КВМ) типа гало, анализируются по данным SOHO/EIT одновременно в трех корональных линиях FeIX/X (171 Å), FeXII (195 Å) и FeIX (284 Å), чувствительных к температурам $T_e \approx 1.2, 1.5$ и 2.0 МК, соответственно, а также в линии переходного слоя HeII (304 Å; $T_e \approx (0.02-0.08)$ МК). Анализ разностных изображений с 6-ч или 12-ч интервалами и предварительной компенсацией вращения Солнца показывает, что обычно димминги наиболее сильно проявляются и имеют аналогичную крупномасштабную структуру в корональных линиях с умеренной температурой возбуждения 171 и 195 Å, а в более высокотемпературной линии 284 Å видны, в основном, наиболее глубокие участки диммингов. Во многих КВМ-событиях обнаруживаются также отчетливые, но сравнительно небольшие по площади димминги в линии переходного слоя 304 Å, в частности, в районах, примыкающих к источнику эрупции. Более того, есть события, в которых наблюдаются димминги в переходном слое, не имеющие корональных аналогов. Эти результаты свидетельствуют о том, что в процессе КВМ открытие магнитных силовых линий, приводящее к уменьшению плотности вещества, может затрагивать и холодную плазму переходного слоя. Эффекты вариаций температуры также нельзя исключить для некоторых димминговых структур.

1. ВВЕДЕНИЕ

Глобальная перестройка и сильные возмущения магнитного поля в процессе эрупции корональных выбросов массы (КВМ) на Солнце сопровождаются такими крупномасштабными явлениями, как димминги, корональные волны, пост-эруптивные аркады и т.д. (см., например, обзоры [1–4] и приведенную там библиографию). Димминги, или транзиентные корональные дыры [5–11], представляют собой области пониженной интенсивности мягкого рентгеновского и крайнего ультрафиолетового (УФ) излучения со временем жизни от нескольких часов до полутора суток, которые формируются вслед за КВМ в окрестности эруптивного центра, например, на периферии предэруптивной сигмоидальной структуры, и могут охватывать значительную часть солнечного диска. Анализ гелиограмм, полученных при помощи телескопов Yohkoh/SXT [12] и SOHO/EIT [13], дает основания интерпретировать димминги, в основном, как результат полного или частичного открытия корональных магнитных полей внутри

этих структур, что приводит 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 линий, регистрируемых на спектрометре SOHO/CDS [14].

Корональная волна — это светящийся фронт, который довольно часто наблюдается перед развивающимися диммингами и может распространяться от центра эрупции со скоростью порядка нескольких сотен км/с [8, 15–22]. Такая волна рассматривается или как МГД-возмущение (ударная волна), являющееся корональным аналогом хромосферной волны Мортон, наблюдаемой в линии H α [23], или как следствие сжатия плазмы на распространяющейся границе димминга, т.е. области открывающихся силовых линий магнитного поля [24, 25].

При простой структуре глобальной солнечной магнитосферы (ГСМ), например, вблизи минимума или на фазе роста цикла активности, когда на

диске присутствует одна активная область, димминги и корональные волны имеют более или менее изотропный характер и развиваются в широком угловом секторе симметрично относительно источника эрупции [8]. В условиях же сложной ГСМ, характерной для максимума цикла, при наличии на диске нескольких активных областей, волокон и других структур, как показано в [26], 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 или совсем не наблюдаются, или тоже являются анизотропными и распространяются в ограниченном угловом секторе.

В ряде случаев наблюдаются так называемые двойные димминги, когда наибольшие понижения интенсивности излучения происходят в двух районах, примыкающих к центру эрупции и расположенных симметрично относительно линии смены полярности магнитного поля и постэруптивной аркады [8, 9]. Такие димминги-близнецы, по видимому, представляют собой основания крупномасштабной скрученной структуры, эруптирующей в процессе КВМ (см. также [2, 27]). Постэруптивная аркада формируется за счет того, что магнитное поле в обширной области короны, сильно возмущенное КВМ, релаксирует к равновесному состоянию посредством магнитного пересоединения, которое происходит высоко в короне в протяженных токовых слоях и сопровождается длительным энерговыделением, ускорением частиц (иногда до весьма высоких энергий) и образованием системы поднимающихся петель [28].

Для выяснения природы диммингов и корональных волн важен анализ наблюдений этих возмущений в различных спектральных линиях и диапазонах. Почти все исследования диммингов (и корональных волн), выполненные к настоящему времени, основаны на рассмотрении или наблюдений Yohkoh/SXT в мягком рентгене, соответствующем температуре $T_e > 2.5$ МК, или/и данных SOHO/EIT в линии крайнего УФ-диапазона FeXII (195 Å), чувствительной к корональной плазме с $T_e \approx 1.5$ МК [6–9, 11, 29]. Использование именно этих данных обусловлено тем, что в них изображения всего диска получены со сравнительно небольшим временным интервалом между соседними кадрами. В частности, в линии 195 Å этот интервал составляет обычно 12 мин. Между тем, на SOHO/EIT гелиограммы полного диска фиксируются еще в двух корональных линиях FeIX/X (171 Å) и FeXV (284 Å), возбуждаемых при $T_e \approx 1.2$

и 2.0 МК, соответственно, а также при помощи фильтра 304 Å [13, 30]. Полоса последнего включает в себя линию переходного слоя HeII ($T_e \approx 0.02–0.08$ МК) и гораздо менее интенсивную корональную компоненту SiXI ($T_e \approx 1.0$ МК). Однако использование гелиограмм на волнах 171, 284 и 304 Å сталкивается с существенным ограничением — значительным интервалом между получаемыми изображениями Солнца, который составляет, как правило, 6 ч. Очевидно, что корональные волны не могут изучаться по таким гелиограммам, но для диммингов, благодаря их большому времени жизни, дело обстоит иначе. Наблюдения в тех же четырех линиях крайнего УФ диапазона с гораздо большим временным разрешением проводятся на космической обсерватории TRACE [31], однако эти данные, так же, как и данные спектрометра SOHO/CDS [14], пока мало используются для изучения крупномасштабных диммингов и корональных волн из-за ограниченного поля зрения этих инструментов [10, 32, 33]. До сих пор анализ крупномасштабных диммингов одновременно по рентгеновским данным Yohkoh/SXT и УФ гелиограммам SOHO/EIT в линии 195 Å, а также с использованием трех корональных линий SOHO/EIT 171, 195, 284 Å выполнен лишь для нескольких событий [8, 9, 29, 34, 35]. Именно в этих работах обнаружена аналогия между диммингами в разнотемпературных корональных линиях, а также в мягком рентгене, и сделан вывод о преобладающей роли открытия магнитных структур и уменьшения плотности плазмы в них по сравнению с возможными изменениями температуры. Анализ же диммингов на солнечном диске с фильтром 304 Å, насколько нам известно, вообще не проводился. В [36] гелиограммы в полосе 304 Å использованы для рассмотрения одного лимбового эруптивного события.

В данной работе представлены результаты анализа диммингов с использованием данных на всех четырех волнах SOHO/EIT, включая линию переходного слоя He II. Это потребовало специальных методических подходов, которые описаны в Разделе 2. Многотемпературные свойства диммингов в корональных линиях FeIX/X, FeXII, FeXV и в линии переходного слоя HeII проиллюстрированы в Разделе 3 на примере четырех событий. Результаты анализа обсуждаются в Разделе 4.

2. МЕТОДИЧЕСКИЕ ЗАМЕЧАНИЯ

В стандартном режиме наблюдений на SOHO/EIT гелиограммы в поле зрения $45' \times 45'$ в формате кадра 1024×1024 при угловом размере пиксела $2.6''$ регистрируются в приоритетной линии

195 Å с интервалом 12 мин, а в остальных линиях 171, 284, 304 Å — четыре раза в сутки около 01, 07, 13 и 19 UT [30]. Только во время редких, непродолжительных специальных программ 12-мин режим вместо 195 Å осуществляется на одной из других линий. Это не меняет, в принципе, ограниченный и неоднородный характер данных, по которым можно анализировать каждое конкретное событие во всех четырех линиях. К тому же, вероятность регистрации крупных эруптивных событий во время таких специальных кратковременных программ невелика. Хотя понятно, что подробный анализ развития диммингов и корональных волн по данным в других, не приоритетных линиях представляет большой интерес и должен стать предметом подробного изучения. В данной работе мы основывались на материалах стандартных наблюдений SOHO/EIT. Соответствующие FITS файлы представлены в Каталоге EIT на сайте <http://umbra.nascom.nasa.gov/eit/eit-catalog.html>.

Для решения поставленной задачи лучше всего подходят события, в которых эрупция КВМ и основное развитие диммингов имели место в пределах 6-ч интервала между указанными выше моментами наблюдений в линиях 171, 284, 304 Å при условии, что в течение этого интервала на Солнце не было других крупных эруптивных событий. Анализ в каждой из четырех линий предполагает сравнение гелиограмм до и после события. Наиболее отчетливо димминги 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 6-ч интервалом, 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 [26], перед вычитанием применена IDL-процедура компенсации солнечного вращения: на каждой волне осуществлялся поворот изображений к одному и тому же моменту времени, обычно перед событием.

Используемая процедура поворота (совмещения) изображений позволила анализировать и такие события, кульминация которых имела место как раз вблизи одного из моментов наблюдений в линиях 171, 284, 304 Å, т.е. 01, 07, 13 или 19 UT, если рассматриваемое событие было изолированным. При этом для получения разностных изображений использовались кадры, отстоящие на 12 ч, а предшествующий вычитанию поворот как базового, так и вычитаемого кадров производился

к центральному кадру во время события, т.е. тоже на 6 ч. Например, если интересующее событие произошло в районе 13 UT, то разностные изображения получались по гелиограммам 07 и 19 UT, которые предварительно были повернуты к 13 UT.

Для адекватного сопоставления диммингов во все четырех линиях реротированные (совмещенные) разностные изображения с 6-ч или 12-ч временными интервалами формировались не только на волнах 171, 284, 304 Å, но и в линии 195 Å. Гораздо более подробные 12-мин данные на этой волне и формируемые по ним последовательные разностные (ПР) и фиксированные разностные (ФР) изображения также с предварительной компенсацией солнечного вращения использованы для получения информации о развитии диммингов и других сопутствующих явлений. ПР-изображения получаются, когда из каждой текущей гелиограммы вычитается предыдущая, а при создании ФР-изображений одна и та же базовая картина диска (обычно перед событием) вычитается из всех последующих гелиограмм. Следует иметь в виду, что ПР-изображения подчеркивают изменения яркости, локализации и структуры источников, произошедшие за время между соседними кадрами. На ФР-изображениях изменения, произошедшие в ходе события, в том числе димминги, видны явно (естественно, относительно выбранного базового кадра до события). Разумеется, при формировании разностных изображений с 6-ч интервалом нет оснований рассматривать все изменения яркости, видимые на диске как связанные непосредственно с рассматриваемым эруптивным событием, даже если оно является изолированным, поскольку слабая независимая активность происходит почти постоянно в других районах диска и также проявляется на разностных гелиограммах.

Как и в [26], чтобы димминги выделялись на фоне других структур, разностные изображения формировались в ограниченном диапазоне интенсивностей. При этом наиболее яркие источники, в частности, возникающие во время вспышек и на постэруптивной фазе, чаще всего оказываются в насыщении. Естественно, общий вид и некоторые детали структуры диммингов несколько меняются в зависимости от выбранного диапазона интенсивностей. Еще одно замечание касается сеточной структуры (системы периодических вертикальных и горизонтальных полос), которая нередко видна на оригинальных SOHO/EIT-изображениях и имеет инструментальное происхождение [13, 30]. При построении реротированных разностных изображений горизонтальные полосы пропадают, а вертикальные усиливаются в пределах диска, особенно, когда гелиограммы приходится поворачивать на значительный угол, например, соответствующий 6-ч интервалу, как в данном случае.

Описанная выше методика формирования разностных изображений SOHO/EIT с 6-ч или 12-ч интервалами, исправленных за вращение солнечного диска, позволила анализировать проявления диммингов одновременно в четырех линиях крайнего УФ диапазона.

3. АНАЛИЗ КОНКРЕТНЫХ СОБЫТИЙ

По описанной выше методике было проанализировано несколько десятков эруптивных событий за 1997–2002 гг., связанных, в основном, с зарегистрированными на коронографе SOHO/LASCO [37] КВМ типа гало, в которых источник эрупции располагался в центральной зоне видимого диска. Для ряда таких событий реротированные разностные изображения с 6-ч или 12-ч интервалами в линиях 171, 195, 284, 304 Å, а также подробные данные о развитии сопутствующих возмущений на волне 195 Å в виде компьютерных JAVA-фильмов, состоящих из ПР- и ФР-изображений, другие иллюстрации, в частности, данные о КВМ, временных профилях и относительной глубине диммингов, представлены на сайте <http://helios.izmiran.troitsk.ru/lars/Chertok/Dimming/general.html>.

Многоволновые характеристики диммингов продемонстрированы ниже на примере тех же трех событий, которые описаны в [26] при изучении канализированных диммингов на волне 195 Å, с добавлением еще одного интересного события с ярко выраженными диммингами в линии переходного слоя. В этом смысле настоящую работу следует рассматривать как продолжение статьи [26], где приведены более подробные сведения о трех первых событиях, в частности, описание развития диммингов в линии 195 Å на основе 12-мин гелиограмм. В данном разделе для каждого из представленных событий на соответствующих рисунках, кроме реротированных разностных изображений с диммингами на всех четырех волнах, расположенных в порядке, соответствующем повышению температуры, приведены оригинальные гелиограммы в линиях 284 и 304 Å, иллюстрирующие общую ситуацию, в которой произошла эрупция.

3.1. Событие 12 мая 1997 г.

Характеристики КВМ типа гало и связанных с ним квазиизотропных крупномасштабных возмущений в этом известном эруптивном событии рассмотрены в целом ряде статей [3, 8, 26, 27, 38]. В частности, в [8] с использованием оригинальных (неразностных) гелиограмм SOHO/EIT продемонстрирована общая аналогия локализации и формы

наиболее глубоких диммингов вблизи эруптивного центра в трех корональных линиях 171, 195 и 284 Å. Интересно проанализировать, как проявляются димминги в этом событии на разностных гелиограммах с 6-ч интервалом, причем не только в корональных линиях, но и в линии переходного слоя 304 Å.

Напомним, что источник эрупции располагался в активной области AR 8038 (область 1 на рис. 1), которая находилась в центральной зоне северной половины диска (N21 W09) и была практически единственной на всей видимой полусфере (рис. 1а, 1б), а событие в целом было связано с длительной вспышкой балла 1F/C1.3 с максимумом около 04:50 UT. КВМ, зарегистрированный на коронографе SOHO/LASCO, имел вид полного гало со свечением вокруг всего затмевающего диска, но обладал наибольшей яркостью над восточным и западным, а также северным секторами лимба [38].

По наблюдениям на волне 195 Å димминги относительно небольшой глубины, а также корональная волна, в данном случае, в условиях сравнительно простой ГСМ, были квазиизотропными и охватывали практически весь видимый диск [3, 8, 26]. На разностной гелиограмме между 07 и 01 UT (рис. 1д) при выбранном ограничении диапазона интенсивности наиболее глубокие димминги видны, в первую очередь, в виде двух сходных по размерам и форме потемнений (диммингов-близнецов), расположенных симметрично относительно центра эрупции, к северо-востоку и юго-западу от яркой компактной постэруптивной аркады 1. Кроме основных диммингов 2 и 3, непосредственно примыкающих к постэруптивной аркаде, заметные понижения интенсивности излучения имеют место и в довольно протяженных ответвлениях 2-4 и 3-5, исходящих из этих диммингов и простирающихся, соответственно, в сторону северной полярной КД и гелиоэкватора. При этом в своем южном конце ответвление димминга 3-5 уширяется и имеет слабое продолжение вдоль гелиоэкватора в западном направлении до точки 6. Еще две узкие ветви димминга 1-7 и 1-8 исходят из восточного края и южной оконечности постэруптивной аркады, причем южная ветвь 1-8 пересекает гелиоэкватор.

На такой же гелиограмме в линии 171 Å (рис. 1г), т.е. при несколько более низкой температуре корональной плазмы, наблюдаются примерно аналогичные димминги. Некоторые отличия касаются южной ветви димминга, которая в данном случае расщепляется в районе 5, а ее приэкваториальное продолжение 5-6 в западном направлении имеет вид двух параллельных полос с гораздо более ярко выраженным потемнением (большей глубиной димминга), чем в линии 195 Å. Еще одно отличие —

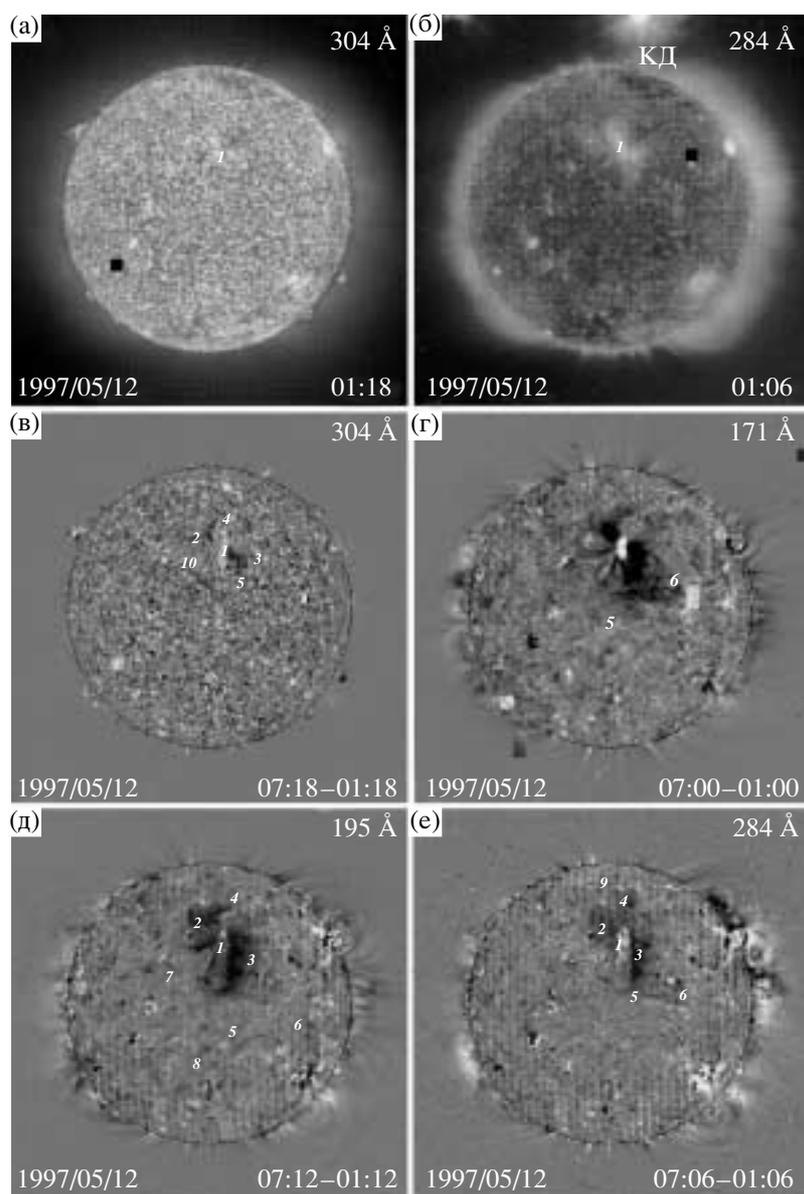


Рис. 1. Событие 12 мая 1997 г.: (а), (б) — фоновые гелиограммы SOHO/EIT в линиях 304 и 284 Å соответственно; (в)–(е) — 6-ч ретирированные разностные изображения соответственно в линиях 304, 171, 195 и 284 Å, иллюстрирующие локализацию и структуру диммингов в переходном слое и короне.

отсутствие трансэкваториальной ветви димминга 1-8, видимой в линии 195 Å.

Описанная двойная структура основных диммингов 2-4 и 3-5 повторяется и в высокотемпературной корональной линии 284 Å (рис. 1е). Из димминговых ответвлений здесь видна также южная компонента направленной к западу приэкваториальной темной полосы 5-6. Кроме диммингов, именно в этой линии лучше всего выражена светящаяся цепочка 1-9, развившаяся к этому времени (07:06 UT) вдоль западной кромки северо-восточного диминга 2-4 от постэруптивной

аркады к южной границе северной приполярной КД. Как показано в [8] и следует из анализа имеющихся гелиограмм (в том числе разностных), в течение последующих 2-12 ч эта цепочка охватила всю южную границу КД и наблюдалась не только в линии 195 Å, но и в трех остальных линиях 171, 284, 304 Å. По-видимому, образование этой цепочки, как и в других подобных случаях [39], является следствием энерговыделения, происходящего в результате взаимодействия между открытыми силовыми линиями КД и крупномасштабными

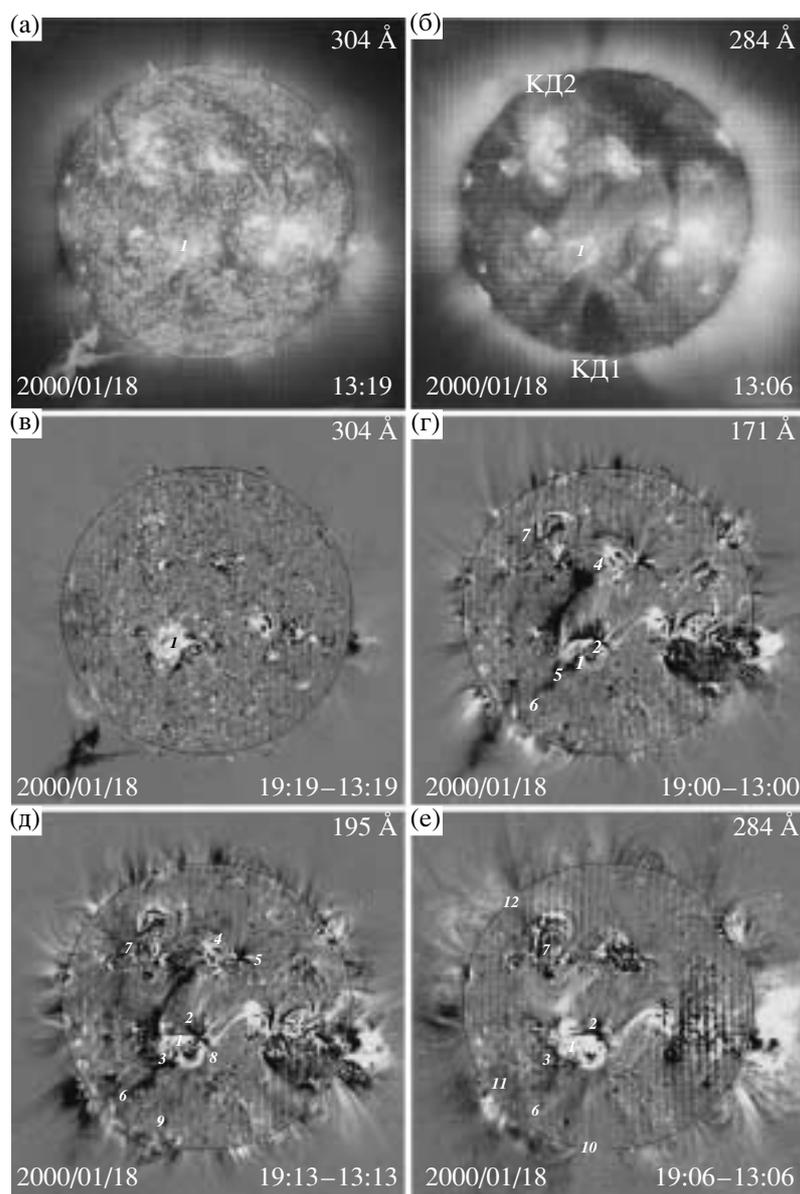


Рис. 2. То же, что на рис. 1, для события 18 января 2000 г.

магнитными структурами, вовлеченными в процесс КВМ.

Существенно, что заметные димминговые проявления видны также и на разностной 6-ч гелиограмме в линии переходного слоя 304 \AA (рис. 1в). Здесь по обе стороны от постэруптивной аркады наблюдаются некоторые аналоги основных корональных диммингов-близнецов 1-2-4 и 1-3-5. Гораздо меньшая ширина и протяженность диммингов на волне 304 \AA , а также их локализация скорее всего свидетельствуют о том, что в данном случае переходного слоя достигают наиболее глубокие, центральные районы корональных диммингов. Кроме того, в линии 304 \AA имеются некоторые

димминговые фрагменты, которые не видны в корональных линиях, например, ответвление 2-10, исходящее из точки 2 в юго-восточном направлении. Как будет видно из дальнейшего, такая ситуация с некоторыми вариациями характерна и для других эруптивных событий.

Следует отметить, что в данном случае, как показывают реротированные разностные гелиограммы с еще большими временными интервалами, описанные выше двойные димминги, а также уярчение вдоль южной границы северной приполярной КД как в трех корональных линиях, так и в линии переходного слоя, наблюдались и в значительной мере сохраняли свою пространственную структуру на протяжении, по крайней мере, 15 ч, т.е. до 19 UT.

3.2. Событие 18 января 2000 г.

В отличие от предыдущего события, это эруптивное событие произошло в условиях достаточно сложной ГСМ, когда на диске наблюдалось несколько активных центров, волокон и КД (рис. 2а, 2б). Оно включало в себя, в частности, длительную вспышку балла 1N/M3.9 с максимумом в 17:27 UT в юго-восточной (координаты S19 E11) области AR 8831 (область 1 на рис. 2) и структурированный КВМ типа гало, который сначала развивался над восточным лимбом и затем охватил все позиционные углы. Заметим, что эруптирующий юго-восточный протуберанец, видимый в излучении на фоновой гелиограмме в линии 304 Å (рис. 2а), а также его отображение на разностных гелиограммах в линиях 304 и 171 Å (рис. 2в, 2г), связаны с предшествующей прилиббовой активностью.

Как показано в [26] и видно на 6-ч разностном изображении в линии 195 Å (рис. 2д), в данном случае соответствующие димминги имели анизотропный характер в форме протяженных канализированных трансэкваториальных структур. Непосредственно вблизи эруптивного центра и постэруптивной аркады 1 виден кольцеобразный димминг с наиболее глубокими северным и юго-восточным элементами 2, 3. Последний соединен ярко выраженной узкой трансэкваториальной полосой димминга с активным центром 4, расположенным в северной половине диска вблизи центрального меридиана, и имеет продолжение 4-5 в западном направлении. С элементом 3 и эруптивным центром 1 связана также юго-восточная петля димминга 1-6, из которой исходит еще один, менее интенсивный, местами фрагментарный, восточный трансэкваториальный канализированный димминг 6-7, простирающийся к активной области, локализованной в северо-восточном квадранте. На данном разностном изображении видны также некоторые другие димминги, описанные в [26], в частности, относительно слабый димминг 8-9, частично окаймляющий границу южной приполярной КД1, наблюдаемой, например, в линии 284 Å (рис. 2б). Вопрос о том, насколько с данным эруптивным событием связаны димминги, наблюдаемые в юго-западном квадранте, остается открытым.

Основные димминги, включая элементы 2 и 3, примыкающие к эруптивному центру, а также обе канализированные трансэкваториальные структуры 6-3-4 и 6-7, наблюдаются и в более низкотемпературной линии 171 Å (рис. 2г).

Однако в самой высокотемпературной линии 284 Å (рис. 2г) проявляются существенные отличия, которые важны для выяснения происхождения диммингов. В данном случае они касаются, в

основном, указанных выше трансэкваториальных диммингов. Здесь восточная димминговая ветвь, идущая к северо-восточному активному комплексу 7, почти незаметна, а в трансэкваториальной структуре 1-4 между эруптивным центром и северной активной областью вместо глубокого димминга имеет место заметное уярчение. Уярчение затрагивает также всю обращенную к экватору систему петель, соединяющих два активных центра северного полушария 4 и 7, т.е. значительную часть пространства между восточной и западной трансэкваториальными ветвями диммингов на волнах 171 и 195 Å. В то же время, в линии 284 Å примыкающие к эруптивному центру наиболее глубокие димминги 2 и 3, а также юго-восточная димминговая петля 3-6 аналогичны тем, которые наблюдаются в линиях 171 и 195 Å. Кроме того, на волне 284 Å некоторое понижение интенсивности излучения (т.е. слабый димминг) происходит в целом в пределах юго-восточного сектора 1-10-11-1, хотя восточная кромка сектора, совпадающая с восточной границей южной полярной КД1, как и некоторые другие узкие структуры внутри сектора, по-видимому, подверглись незначительному уярчению. В линии 284 Å больше, чем в других линиях, заметен димминг 7-12, простирающийся к северо-восточному лимбу вдоль узкой КД2.

Что касается линии 304 Å, то, как показывает соответствующая разностная гелиограмма (рис. 2в), проявления диммингов в переходном слое в данном событии незначительны. Видны лишь сравнительно небольшие по площади фрагменты диммингов, наблюдаемых в корональных линиях вокруг эруптивного центра 1. В частности, отчетливые димминговые фрагменты и узкие петлеобразные структуры располагаются к востоку, югу и западу от центра эрупции.

3.3. Событие 17 февраля 2000 г.

Данное событие имело место через оборот примерно на том же участке солнечной поверхности, что и предыдущее событие (раздел 3.2), т.е. при такой же сложной ГСМ. 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 8872 (S25 W16 и S29 E07; области 1 и 2 на рис. 3) и достигли максимума в мягком рентгене в 18:52 и 20:35 UT, соответственно [40]. 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 сформировался почти симметричный КВМ типа гало.

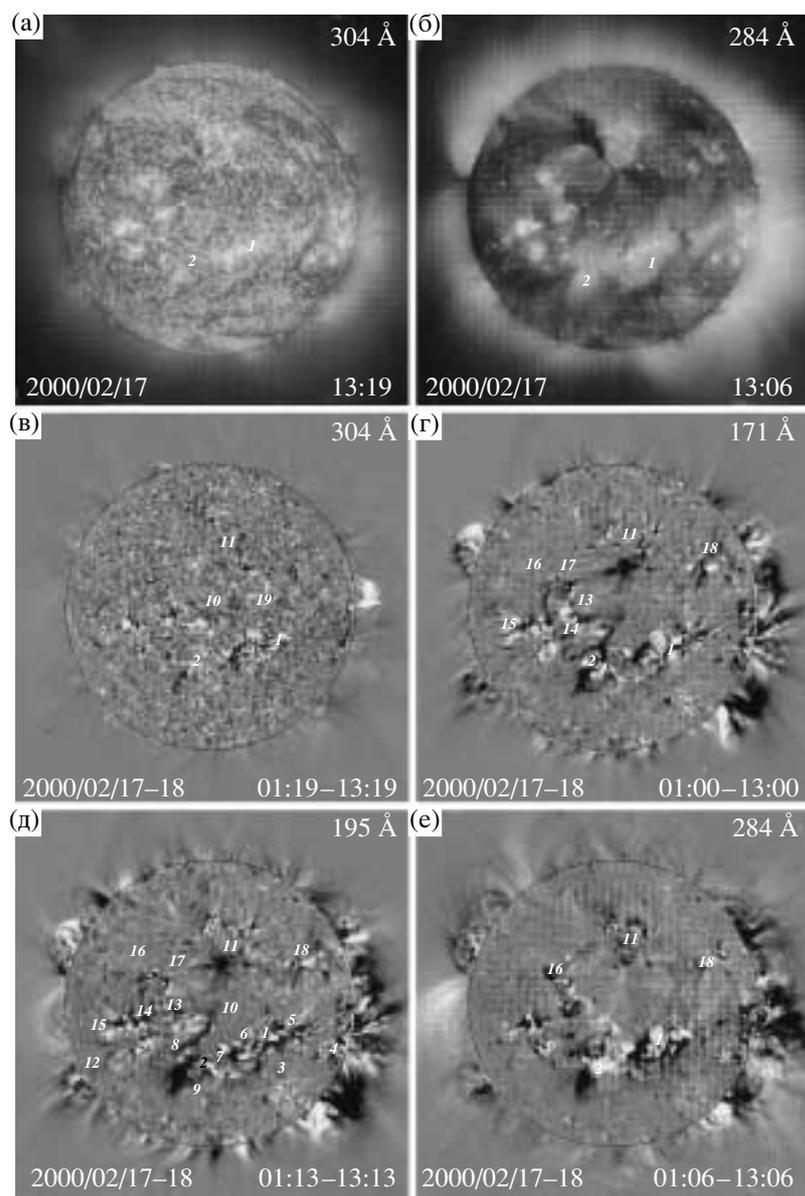


Рис. 3. То же, что на рис. 1, для события 17 февраля 2000 г. Реротированные разностные изображения (v)–(e) получены с 12-ч интервалом между 13 UT и 01 UT 18.02.2000 с предварительным поворотом всех гелиограмм к 19 UT 17.02.2000.

Поскольку существенное развитие события происходило около 19 UT, в данном случае для получения разностных изображений в четырех линиях нельзя использовать кадры, относящиеся к этому времени. Поэтому представленные на рис. 3в–3е реротированные разностные гелиограммы получены с 12-ч интервалом как разность между кадрами 13 UT 17 февраля и 01 UT 18 февраля, с предварительным поворотом их на каждой волне к 19 UT 17 февраля. Анализ этих гелиограмм подтверждает заключение, сделанное в [26] на основе рассмотрения подробных данных в линии 195 Å, что сопровождающие это событие димминги носили глобальный характер, были, в

основном, канализированными, обозначали магнитную связь между всеми активными областями, локализованными в центральном секторе диска по обе стороны от гелиоэкватора, и охватывали все пространство между ними (см. также [40]).

Такая структура диммингов видна и на 12-ч разностной гелиограмме в линии 195 Å (рис. 3д). Здесь ряд диммингов примыкает к западному центру эрупции 1. В западном направлении из него исходят одна или две полосы димминга 3–4 и расположенный севернее димминг 5. От точки 3 ответвляются две димминговые дуги, огибающие эруптивный центр 1 с юга и простирающиеся к восточному диммингу 6. Последний, в свою очередь,

соединен с восточным эруптивным центром 2 узким каналом 6-7. Этот центр окружен с севера диммингом 7-8, а с юга — ярко выраженной димминговой петлей 9. Трансэкваториальный димминговый канал 7-10-11 идет от эруптивного центра 2 через узел 10 к северной активной области. Связь между этими областями и областями, расположенными восточнее центрального меридиана, обозначается также рядом димминговых каналов, в частности, такими, как южные горизонтальные полосы 8-12, 10-13-14-15, северная горизонтальная полоса 16-17-11 и соединяющие их вертикальные димминги 13-17 и 14-16. Северная горизонтальная полоса 16-17-11 продолжается в западном направлении в район северо-западной области 18, в окрестности одной из небольших КД. Относительно слабые, но все же заметные трансэкваториальные димминги связывают западный эруптивный центр 1 непосредственно с северной областью 11, а также с северо-западной областью 18. В целом, описанная глобальная система канализированных диммингов отражает тот факт, что в процесс эрупции были вовлечены магнитные структуры всего кругообразного центрального сектора диска. Как отмечено в [26], расположение и конфигурация большинства канализированных диммингов соответствуют элементам кольцеобразной системы светящихся УФ цепочек, которая была видна, в частности, в линии 195 Å, до события в том же центральном секторе диска. Скорее всего, эрупцией именно этих магнитных структур обусловлена наблюдавшаяся в данном событии квазисимметричная кольцевая форма КВМ типа гало.

Примерно такая же система диммингов видна на аналогичной гелиограмме и в линии 171 Å (рис. 3г). Среди незначительных различий можно отметить несколько более слабое проявление диммингов между западным эруптивным центром 1 и северными областями 11, 18. Зато узел 13, а также основные восточные и северо-восточные димминговые каналы, в частности, выстроенные вдоль линии 15-14-16-17-11, выражены более отчетливо.

Несколько иная ситуация с диммингами наблюдается в высокотемпературной линии 284 Å. Соответствующая разностная гелиограмма (рис. 3е) показывает все основные димминги, примыкающие к эруптивным центрам 1, 2б и, в целом, как и в двух других корональных линиях, посредством канализированных диммингов обозначает связь между активными областями центрального сектора диска. При этом некоторые восточные трансэкваториальные димминги выражены слабее, а западные, например, в полосе 1-18, — чуть более интенсивно. Однако в линии 284 Å нет аналога диммингового узла 10 и всего центрального трансэкваториального димминга между восточным эруптив-

ным центром 2 и северной активной областью 11 (рис. 3г, 3д). Напротив, здесь на месте димминга присутствует небольшое уярчение, а незначительное понижение уровня излучения наблюдается к западу от этой структуры, вплоть до полосы 1-18. Еще одна, более яркая трансэкваториальная структура простирается из зоны между эруптивными центрами 1, 2 к северо-западной димминговой области 16.

В линии переходного слоя 304 Å (рис. 3в), как и в предыдущих событиях, видны, в основном, фрагменты наиболее глубоких диммингов, в частности, вблизи эруптивных центров 1 и 2. Выделяется также упоминавшийся выше димминговый узел 10 на линии между областями 2 и 11. Существенно, что несколько западнее и севернее узла 10 появляется новый димминговый узел 19, который отсутствует в корональных линиях. На экране компьютера и качественных отпечатках гелиограммы (рис. 3в) можно видеть, что этот узел 19 связан слабым диммингом с северной активной областью 11.

3.4. Событие 29 апреля 1998 г.

Это эруптивное событие включало в себя длительную вспышку балла 3В/М6.8 в юго-восточной активной области AR 8210 (координаты S21 E03) с максимумом мягкого рентгеновского излучения в 16:37 UT. Примечательно, что при этом соответствующий КВМ имел вид гало с наибольшей яркостью белого света над северо-восточным и юго-западными секторами лимба. Во время события область AR 8210 (район 1 на рис. 4) была практически единственной на диске, но соседствовала с крупной трансэкваториальной КД1 (рис. 4б), которая занимала почти всю центральную зону диска, и с еще двумя, гораздо меньшими КД2 и КД3, расположенными между источником эрупции 1 и восточным лимбом. По-видимому, с этими особенностями ГСМ были связаны, в частности, необычный вид КВМ [35] и пекулярные проявления диммингов в линии 304 Å (см. ниже).

Анализ ПР- и ФР-изображений и фильмов в линии 195 Å, сформированных по имеющимся данным с временным интервалом 12–16 мин, обнаруживает дополнительные особенности рассматриваемого события (см. указанный в начале раздела 3 сайт в интернете). Отчетливая корональная волна распространялась из центра эрупции в двух угловых секторах: в сторону северо-восточного лимба и в восточном направлении, т.е. через КД1. (Такое распространение корональной волны внутри КД, по-видимому, наблюдается редко и заслуживает рассмотрения в специальной статье). Основные димминги в линии 195 Å, как и первый сектор корональной волны, развивались в направлении

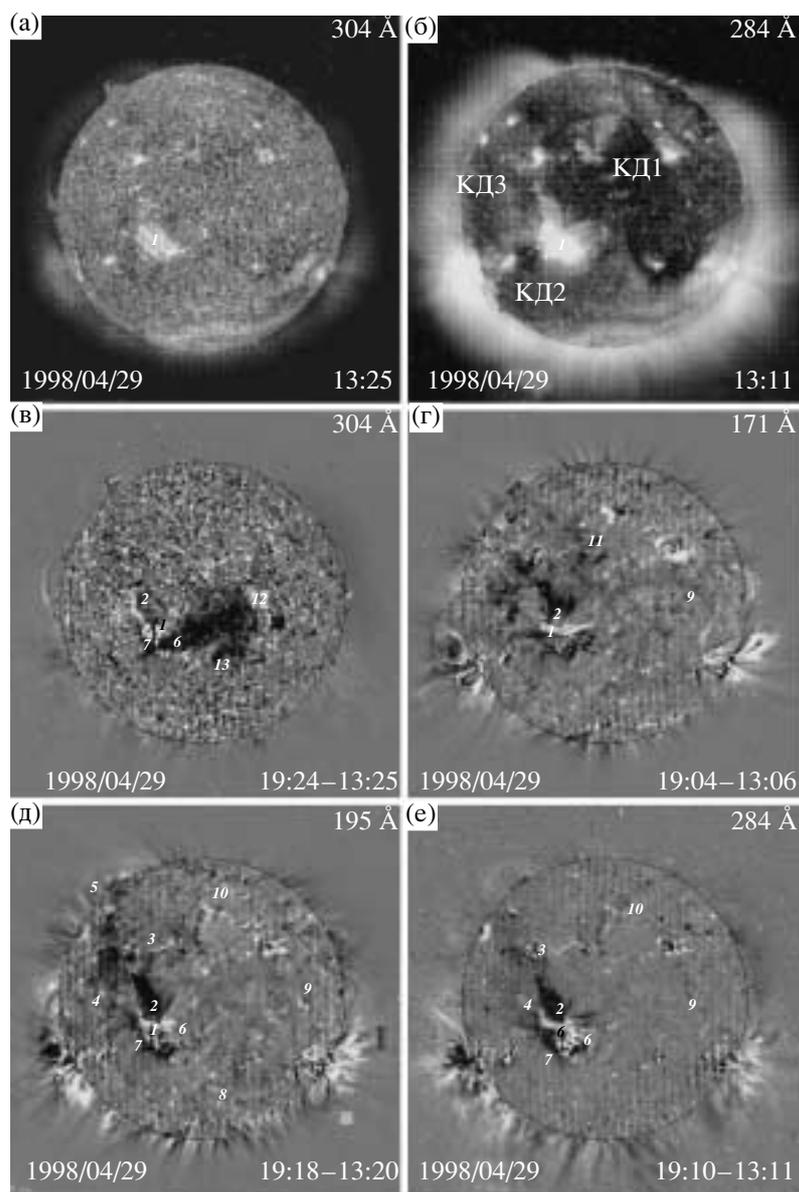


Рис. 4. То же, что на рис. 1, для события 29 апреля 1998 г.

северо-восточного лимба. Это можно видеть и на 6-ч реротированной разностной гелиограмме (рис. 4д). Здесь глубокий трансэкваториальный димминг 2, сформировавшийся в непосредственной близости от КД1, имеет продолжение к области 3 и соединяется с восточным меридиональным диммингом 4-5. С юга центр эрупции 1 огибается узким диммингом 6-7, который имеет несколько еще более узких продолжений в восточном и северо-восточном направлениях, в частности, к точке 4. Слабые димминговые проявления, наряду с фрагментарными уярчениями, наблюдаются также вдоль южной (8-9) и северной (3-10) границ КД1. Заметно, что слабым понижением интенсивности охвачено также все пространство КД1, на

фоне которого выделяются несколько дугообразных каналов, в частности, между точками 6 и 9. Аналогичное слабое понижение, возможно, имеет место к востоку от димминга 7-4-5.

Как обычно, сходная, в целом, структура диммингов наблюдается и в линии 171 Å (рис. 4г). В числе незначительных отличий от проявлений в линии 195 Å можно отметить, что димминг 2 непосредственно вблизи эруптивного центра 1 несколько расширен в долготном направлении; восточный меридиональный димминг 4-5 (рис. 4д), особенно его северная часть, представлен лишь отдельными фрагментами. Кроме того, усилены небольшие по площади димминги 11 вблизи северной границы

КД1 и некоторые димминги внутри КД1, в частности, дугообразная структура 2–9.

В данном событии основной димминг 2 и его трансэкваториальное продолжение к северо-восточной области 3 присутствуют, хотя и в несколько ослабленном виде, и на разностной гелиограмме в высокотемпературной корональной линии 284 Å (рис. 4е). Тенденция к ослаблению димминга 2–3 с ростом температуры подтверждается данными $Yohkoh/SXT$: как показано в [35], в мягком рентгене, т.е. при еще большей температуре плазмы $T_e > 2.5$ МК, димминг 2 вообще практически не виден. В линии 284 Å также почти не проявляется восточный меридиональный димминг 4–5, наиболее заметный в линии 195 Å (рис. 4). В то же время, димминг 6–7–4, проходящий южнее и юго-восточнее кромки постэруптивной аркады 1, выражен так же четко, как и в двух других корональных линиях. В линии 284 Å можно видеть также изменения интенсивности излучения, соответствующие КД1. Вдоль ее северной границы наблюдаются слабо светящиеся цепочки 3–10, которые соседствуют с узкими и тоже слабыми димминговыми структурами. Такие же структуры локализируются вдоль западной границы (9–10) и внутри КД1 (6–9).

В отличие от трех описанных выше событий, в данном случае самые большие по площади димминги проявляются на разностной гелиограмме в линии переходного слоя 304 Å (рис. 4в). Помимо того, что в этой линии хорошо видны аналоги северного (2) и южного (6–7) корональных диммингов вблизи центра эрупции 1, существенное по интенсивности и значительное по площади понижение интенсивности (т.е. транзиентная дыра) наблюдается в южной части КД1. Глубокий димминг начинается от расширившейся восточной оконечности (6) южного димминга, охватывает значительный, простирающийся к западу участок КД1 вплоть до точки 12, затем загибается и продолжается в юго-восточном направлении до точки 13, расположенной вблизи южной границы КД1. Это, по-видимому, означает, что происходящая в результате эрупции КВМ перестройка структуры магнитного поля (открытие силовых линий) затронула и нижележащую плазму переходного слоя в южной части КД1, а также в пространстве между эруптивным центром 1 и КД1. Как видно из рис. 4в, этот процесс сопровождался также образованием светящейся цепочки вдоль южной границы димминга 6. Аналогичная светящаяся структура присутствует также на восточной кромке димминга 2.

4. ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обработка УФ-гелиограмм SOHO/EIT с использованием процедуры компенсации вращения

солнечного диска позволила формировать реротированные разностные изображения с 6–ч (а при необходимости и с 12–ч) интервалом и исследовать димминги (транзиентные КД), возникающие в результате КВМ, одновременно в трех корональных линиях (171, 195, 284 Å) и линии переходного слоя (304 Å). Это стало возможным еще и благодаря тому, что время жизни основных диммингов обычно превышает указанные выше интервалы.

Проведенный анализ еще раз свидетельствует о том, что димминговые возмущения и транзиентные уярчения от крупных КВМ, по крайней мере, в трех корональных линиях, в целом, носят глобальный характер и простираются между удаленными центрами активности, в том числе по обе стороны от гелиоэкватора. Это означает, что в процесс эрупции оказывается вовлеченной значительная часть ГСМ. В первую очередь, в этот процесс, вероятно, включаются структуры, которые имеют прямую магнитную связь с эруптивным центром [41].

Также во всех четырех линиях подтверждено заключение, сделанное в [26] на основе анализа подробных данных в линии 195 Å, что в условиях сложной по структуре ГСМ, когда на диске присутствуют несколько активных областей, волокон, КД и т.д., многие димминги являются анизотропными и наблюдаются в виде узких, протяженных каналов.

Понижение интенсивности крайнего УФ-излучения во многих диммингах во всех четырех линиях сравнимо с тем, что наблюдается в линии 195 Å и, согласно оценкам [3, 9, 26], может достигать десятков процентов.

Ярко выраженные димминги, примыкающие непосредственно к эруптивному центру, регистрируются во всех четырех линиях. При этом в трех корональных линиях они имеют почти одинаковую форму и локализацию, а в линии переходного слоя обычно видна не вся площадь диммингов, наблюдаемых в короне, а только их наиболее глубокие фрагменты. Это свидетельствует, во-первых, в пользу сделанного ранее вывода [3, 8, 9], что такие димминги образуются в результате происходящего в связи с КВМ частичного или полного открывания силовых линий в соответствующих магнитных структурах и эвакуации плазмы из них, а во-вторых, о том, что этот процесс, наряду с корональной плазмой, затрагивает в определенной степени и плазму переходного слоя. Следует иметь в виду, что наблюдаемые в непосредственной близости от эруптивного центра (активной области) в линии 304 Å фрагментарные димминги могут быть частично обусловлены ослаблением излучения в корональной линии SiXI, которая также фиксируется фильтром 304 Å [13, 30].

Канализированные димминги, особенно трансэкваториальные, сильнее всего и практически одинаковым образом проявляются в двух корональных линиях 171 и 195 Å с умеренной температурой возбуждения. В высокотемпературной линии 284 Å, как показывают, например, события 18 января и 17–18 февраля 2000 г. (разделы 3.2 и 3.3), на месте некоторых трансэкваториальных диммингов наблюдается уярчение существовавших до этого петлеобразных структур. Это указывает на то, что в таких структурах понижение интенсивности крайнего УФ-излучения в одних линиях и его уярчение в других могут быть инициировано изменениями температуры плазмы, например, нагревом под действием тепловых или МГД-возмущений, связанных с эрупцией КВМ. Приведенные выше утверждения не означают, что трансэкваториальные димминги вообще не наблюдаются в высокотемпературной УФ-линии и даже в мягком рентгене. Примеры трансэкваториальных диммингов в линии 284 Å указаны при описании событий 17–18 февраля 2000 г. (раздел 3.3) и 29 апреля 1998 г. (раздел 3.4), а в мягком рентгене — в [21, 42] по данным Yohkoh/SXT. В [43] на основе анализа большого числа трансэкваториальных петель показано, что вариации интенсивности крайнего УФ- (195 Å) и мягкого рентгеновского излучений в связи с КВМ в одних случаях могут проявляться в виде диммингов, а в других — в виде уярчений таких петель.

При анализе гелиограмм в линии переходного слоя 304 Å обнаруживаются димминги, которые не видны в корональных линиях и появляются вдали от активных областей. В одних случаях, как в событии 17–18 февраля 2000 г. (раздел 3.3), это сравнительно небольшие по площади и степени понижения интенсивности излучения димминговые элементы, в других (событие 29 апреля 1998 г., раздел 3.4) — ярко выраженные димминги, занимающие значительную часть соседней с центром эрупции крупной КД. Такие димминги могут возникать, в частности, в результате прогрева плазмы переходного слоя (так называемое опускание короны) в процессе эрупции КВМ. Другая возможность — открытие силовых линий и истечение вещества из первоначально закрытых низко лежащих структур переходного слоя. Применительно к событию 29 апреля 1998 г. вторая возможность означает прямое вовлечение в процесс эрупции плазмы переходного слоя, т.е. формирование некоего продолжения значительной части существующей КД на высотах переходного слоя, т.е. образование транзитной “дыры” в переходном слое.

Как отмечалось в разделе 3, в некоторых событиях после эрупции КВМ на границах ряда

диммингов или КД во всех четырех линиях наблюдаются уярчения в виде протяженных светящихся цепочек [8, 39]. Их возникновение, скорее всего, связано с энерговыделением, которое может происходить в процессе магнитного пересоединения при взаимодействии эволюционирующих открытых структур, участвующих в КВМ, с соседними закрытыми магнитными полями.

В заключение стоит еще раз подчеркнуть, что проведенный анализ диммингов выполнен по реротированным разностным гелиограммам SOHO/EIT с 6-ч и 12-ч интервалами. Очевидно, что это следует рассматривать лишь как начальный этап. Более детальный анализ связанных с КВМ возмущений (особенно корональных волн) в различных спектральных линиях требует гораздо большего временного разрешения, достигающего до десятков секунд или нескольких минут. Такие наблюдения проводятся, в частности, в тех же четырех линиях на космической обсерватории TRACE, правда, с ограниченным полем зрения [31, 33], и космической обсерватории КОРОНАС-Ф, где получают изображения всего диска [44, 45].

Авторы благодарны коллективу SOHO/EIT за данные, использованные при анализе. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 03-02-16049 и 03-02-16591), а также при частичной поддержке Минпромнауки РФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. D. F. Webb, *J. Atmosph. and Solar-Terr. Phys.* **62**, 1415 (2000).
2. A. S. Sterling, *J. Atmosph. and Solar-Terr. Phys.* **62**, 1427 (2000).
3. N. Gopalswamy and B. J. Thompson, *J. Atmos. and Solar-Terr. Phys.* **62**, 1458 (2000).
4. H. S. Hudson and E. W. Cliver, *J. Geophys. Res.* **106**, 25199 (2001).
5. D. M. Rust, *Space Sci. Rev.* **34**, 21 (1983).
6. A. C. Sterling and H. S. Hudson, *Astrophys. J.* **491**, L55 (1997).
7. H. S. Hudson and D. F. Webb, in *Coronal Mass Ejections*, Ed. by N. Crooker, J. Joselyn, and J. Feynman, AGU Geophysical Monograph Ser. № 99, 27 (1997).
8. B. J. Thompson, S. P. Plunkett, J. B. Gurman, *et al.*, *Geophys. Res. Lett.* **25**, 2465 (1998).
9. D. M. Zarro, A. C. Sterling, B. J. Thompson, *et al.*, *Astrophys. J.* **520**, L139 (1999).
10. L. K. Harra and A. C. Sterling, *Astrophys. J.* **561**, L215 (2001).
11. S. W. Kahler and H. S. Hudson, *J. Geophys. Res.* **106**, 29239 (2001).
12. S. Tsuneta, L. Acton, M. Bruner, *et al.*, *Solar Phys.* **136**, 37 (1991).

13. J.-P. Delaboudinière, G. E. Artzner, J. Brunaud, *et al.*, *Solar Phys.* **162**, 291 (1995).
14. R. A. Harrison, E. C. Sawyer, and M. K. Carter, *Solar Phys.* **162**, 233 (1995).
15. B. J. Thompson, J. B. Gurman, W. M. Neupert, *et al.*, *Astrophys. J.* **517**, L151 (1999).
16. A. Klassen, H. Aurass, G. Mann, *et al.*, *Astron. and Astrophys.* **141**, 357 (2000).
17. B. J. Thompson, B. Reynolds, H. Aurass, *et al.*, *Solar Phys.* **193**, 161 (2000).
18. A. Warmuth, B. Vrsnak, H. Aurass, *et al.* *Astrophys. J.* **560**, L105 (2001).
19. D. A. Biesecker, D. C. Myers, B. J. Thompson, *et al.*, *Astrophys. J.* **569**, 1009 (2002).
20. N. Narukage, H. S. Hudson, T. Morimoto, *et al.*, *Astrophys. J.* **572**, L109 (2002).
21. J. L. Khan and H. Aurass, *Astron. and Astrophys.* **383**, 1018 (2002).
22. H. S. Hudson, J. L. Khan, J. R. Lemen, *et al.*, *Solar Phys.* **212**, 121 (2003).
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. И. М. Черток, В. В. Гречнев, *Астрон. журн.* **80**, 162 (2003).
27. D. F. Webb, R. P. Lepping, L. Burlaga, *et al.*, *J. Geophys. Res.* **105**, 27251 (2000).
28. I. M. Chertok, *Proc. of the Fifth SOHO Workshop*, ESA SP-**404**, 269, 1997.
29. S. Pohjolainen, D. Maia, M. Pick, *et al.*, *Astrophys. J.* **556**, 421 (2001).
30. D. Moses, F. Clette, J.-P. Delaboudinière, *et al.*, *Solar Phys.* **175**, 571 (1997).
31. B. N. Handy, L. W. Acton, C. C. Kankelborg, *et al.*, *Solar Phys.* **187**, 229 (1999).
32. M. J. Wills-Davey and B. J. Thompson, *Solar Phys.* **190**, 467 (1999).
33. L. K. Harra and A. C. Sterling, *Astrophys. J.* in press.
34. A. C. Sterling, H. S. Hudson, B. J. Thompson, *et al.*, *Astrophys. J.* **532**, 628 (2000).
35. H. Wang, P. R. Goode, C. Denker, *et al.*, *Astrophys. J.* **536**, 971 (2000).
36. C. Delannée, *J. Atmosph. and Solar-Terr. Phys.* **62**, 1471 (2000).
37. G. E. Brueckner, R. A. Howard, M. J. Koomen, *et al.*, *Solar Phys.* **162**, 357 (1995).
38. S. P. Plunkett, B. J. Thompson, R. A. Howard, *et al.*, *Geophys. Res. Lett.* **25**, 2477 (1998).
39. I. M. Chertok, *Solar Phys.* **198**, 367 (2001).
40. H. Wang, V. Yurchyshyn, J. Chae, *et al.*, *Astrophys. J.* **559**, 1171 (2001).
41. T. Wang, Y. Yan, J. Wang, *et al.*, *Astrophys. J.* **572**, 580 (2002).
42. J. I. Khan and H. S. Hudson, *Geophys. Res. Lett.* **27**, 1083 (2000).
43. A. Glover, L. K. Harra, S. A. Matthews, and C. A. Foley, *Astron. and Astrophys.* in press.
44. В. Н. Ораевский, И. И. Собельман, *Письма в “Астрон. журн.”* **28**, 457 (2002).
45. И. А. Житник, О. И. Бугаенко, А. П. Игнатъев и др., *Письма в “Астрон. журн.”* (в печати).

LARGE-SCALE DIMMINGS PRODUCED BY SOLAR CORONAL MASS EJECTIONS ACCORDING TO SOHO/EIT OBSERVATIONS IN FOUR EUV LINES

I. M. Chertok and V. V. Grechnev

SOHO/EIT data are used to analyze dimmings, or transient coronal holes (regions of reduced soft-X-ray and EUV emission), which can be observed on the solar disk after halo-type coronal mass ejections (CMEs). Simultaneous observations in the 171 Å FeIX/X, 195 Å FeXII, and 284 Å FeIX coronal lines, which are sensitive to temperatures of $T_e \approx 1.2$, 1.5, and 2.0 MK, respectively, are considered, together with the 304 Å HeII transition-region line ($T_e \approx (0.02-0.08)$ MK). Difference images taken at intervals of 6 h and 12 h and tentatively compensated for the solar rotation indicate that dimmings are normally strongly pronounced and have similar large-scale structures in the moderate-excitation-temperature 171 and 195 Å coronal lines, while the higher-temperature 284 Å line mainly reflects the deepest portions of the dimmings. In addition, dimmings of relatively small areas can clearly be seen during many CMEs in the 304 Å transition-region line, in particular, in regions next to the source of the eruption. Dimmings in the transition region are observed without coronal counterparts during some events. These results suggest that the opening of the magnetic-field lines and density reduction that occur during a CME can also involve the cold plasma of the transition region. In addition, the effects of temperature variations cannot be ruled out for some dimming structures.