

УДК 523.985-866

КРУПНОМАСШТАБНАЯ АКТИВНОСТЬ В СОЛНЕЧНЫХ ЭРУПТИВНЫХ СОБЫТИЯХ ОКТЯБРЯ–НОЯБРЯ 2003 г. ПО ДАННЫМ SOHO/EIT

© 2005 г. И. М. Черток¹, В. В. Гречнев²

¹Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн, Троицк, Россия

²Институт солнечно-земной физики, Иркутск, Россия

Поступила в редакцию 30.06.2004 г.; принята в печать 15.07.2004 г.

По данным УФ-телескопа SOHO/EIT анализируются крупномасштабные возмущения на Солнце, связанные с мощными вспышками и корональными выбросами массы (КВМ), которые произошли в октябре–ноябре 2003 г. во время двух прохождений по диску грандиозного комплекса из трех активных областей. В частности, димминги (транзиентные корональные дыры) и, в меньшей степени, корональные волны (распространяющиеся излучающие фронты) исследуются на основе деротированных фиксированных разностных изображений, в которых предварительно компенсируется солнечное вращение и одна и та же гелиограмма перед событием вычитается из всех последующих гелиограмм. Такой метод позволяет изучать разностные гелиограммы как в линии 195 Å с 12-мин интервалом, так и в каналах разных температур 171, 195, 284, 304 Å с 6-ч интервалом. Анализ показывает, что практически во всех эруптивных событиях в течение двух оборотов возмущения, связанные с КВМ, имели глобальный характер и охватывали почти всю южную половину диска. При этом северная половина диска, где присутствовала обширная корональная дыра, затрагивалась возмущениями в гораздо меньшей степени. Преобладающие димминги на диске наблюдались как узкие протяженные образования, простирающиеся, в основном, между тремя главными удаленными областями комплекса, а также в виде протяженных структур, расположенных вдоль параллели в южном полярном секторе. В повторяющихся с небольшим временным интервалом событиях наблюдавшиеся основные димминги обнаружили явную гомологию по их форме и локализации. В ходе мощнейшего события 28 октября одна гомологическая глобальная димминговая система сменилась на другую. Многие димминги проявлялись одинаковым или сходным образом в трех корональных каналах и в линии переходного слоя. Из приведенных данных следует, что одни и те же быстро восстанавливающиеся глобальные структуры на высотах короны и переходного слоя были вовлечены в процесс эрупции последовательных КВМ и соответствующую перестройку крупномасштабных магнитных полей.

1. ВВЕДЕНИЕ

Беспрецедентно высокая для фазы спада 11-летнего цикла солнечная активность имела место в октябре–ноябре 2003 г. В течение 15 дней, во время первого прохождения по диску комплекса из трех крупных активных областей на спутниках серии GOES в мягком рентгеновском диапазоне зарегистрирована серия из 11 мощных вспышек балла от X1 до X28. За время двух солнечных оборотов комплекса на коронографе белого света SOHO/LASCO [1] наблюдалось несколько десятков крупных корональных выбросов массы (КВМ), в том числе 16 КВМ типа гало со свечением вокруг всего или большей части затмевающего диска. Эти эруптивные события сопровождались сильнейшими межпланетными возмущениями, рядом возрастаний потоков протонов, в одном из которых интен-

сивность у Земли в диапазоне > 10 МэВ достигла $29\,500 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}$, геомагнитными бурями с индексом $D_{st} \approx -401$ и -465 нТл на первом и втором оборотах, соответственно, а также глубокими Форбуш-понижениями галактических космических лучей и другими сопутствующими явлениями (см. Preliminary Report and Forecast of Solar Geophysical Data на Web-сайте <http://www.sel.noaa.gov/weekly.html> и Solar-Geophysical Data на сайте <http://sgd.ngdc.noaa.gov/sgd/jsp/solarindex.jsp>, а также компилятивную статью [2]).

Указанная активность представляет интерес для исследований с разных точек зрения. Настоящая работа посвящена анализу солнечных проявлений этой активности с пространственным масштабом, сравнимым с радиусом Солнца и даже диаметром видимого диска, в основном,

по данным телескопа крайнего УФ-диапазона SOHO/EIT [3]. Речь идет, в частности, о таких связанных с КВМ явлениях, как димминги и, в меньшей мере, корональные волны. Напомним, что димминги или транзитные корональные дыры [4–13] представляют собой области пониженной интенсивности мягкого рентгеновского и крайнего УФ-излучения с временем жизни от нескольких часов до 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 [14] и SOHO/EIT, дает основания интерпретировать димминги, в основном, как результат полного или частичного раскрытия корональных магнитных полей внутри этих структур в процессе КВМ, что приводит к эвакуации вещества и соответствующему уменьшению интенсивности излучения.

Корональная волна — это светящийся фронт, который наблюдается перед развивающимися диммингами и может распространяться от центра эрупции со скоростью порядка нескольких сотен км/с [6, 15–21]. Такая волна рассматривается или как МГД-возмущение (ударная волна), являющееся корональным аналогом хромосферной волны Мортонa, наблюдаемой в линии $H\alpha$ [22], или как следствие сжатия плазмы на распространяющейся границе димминга, т.е. области открывающихся силовых линий магнитного поля [23, 24].

Данные и метод анализа описаны в Разделе 2. Характеристики крупномасштабной активности проиллюстрированы в Разделе 3 на примере ряда крупнейших событий, произошедших в течение первого и второго прохождений комплекса. Результаты анализа обсуждаются в Разделе 4.

2. ДАННЫЕ И МЕТОД АНАЛИЗА

В течение рассматриваемого периода наблюдения на SOHO/EIT проводились в стандартном режиме. Гелиограммы в поле зрения $45' \times 45'$ в формате кадра 1024×1024 при угловом размере пиксела $2.6''$ регистрировались с интервалом 12 мин в приоритетном канале 195 \AA , чувствительном к корональной плазме с температурой $T_e \approx 1.5 \text{ MK}$. Еще в двух корональных каналах $171, 284 \text{ \AA}$ ($T_e \approx 1.2$ и 2.0 MK) и канале 304 \AA с линией переходного слоя $HeII$ ($T_e \approx 0.02\text{--}0.08 \text{ MK}$) — четыре раза в сутки в районе $01^h, 07^h, 13^h$ и 19^h UT [3, 25]. Соответствующие FITS-файлы представлены в каталоге EIT на сайте <http://umbra.nascom.nasa.gov/eit/eit-catalog.html>.

Как и в [26–28], анализ проводился по методу фиксированных деротированных разностных изображений, формируемых в два этапа. Сначала осуществлялась компенсация солнечного вращения путем поворота (деротации) всех гелиограмм, относящихся к данному событию, ко времени выбранной фоновой гелиограммы перед событием. Деротация применялась к видимой полусфере с вращением сферической поверхности на гелиоцентрическом расстоянии $r \approx 1R_\odot$. На втором этапе это фоновое изображение вычиталось из всех последующих деротированных гелиограмм. Такие фиксированные разностные изображения показывают реальные изменения яркости, локализации и структуры источников излучения, происходящие в течение события. На них димминги видны как темные образования пониженной интенсивности, а корональная волна — как узкий светящийся фронт, распространяющийся от центра эрупции. В качестве вспомогательных разностных изображения, которые получают вычитанием из каждого изображения предшествующего ему кадра. Они подчеркивают изменения, происходящие между двумя соседними гелиограммами, но из-за способа их формирования содержат артефактные образования.

Чтобы димминги и корональные волны выделялись на фоне других структур, разностные изображения строились в ограниченном диапазоне интенсивностей. При этом наиболее яркие источники, в частности, возникающие во время вспышек и на постэруптивной фазе, обычно оказываются в насыщении.

Благодаря процедуре деротации оказалось возможным формировать и анализировать разностные изображения не только в линии 195 \AA , но и во всех четырех разнотемпературных каналах EIT $171, 195, 284$ и 304 \AA , используя гелиограммы с 6- и 12-ч интервалами [27].

Предметом анализа в данной работе были не только вспышки большого рентгеновского балла, но и другие значительные эруптивные события, которые включали в себя крупные КВМ и сопровождалась значительными изменениями структур на видимом диске. Необходимая информация и подробные данные о 34 таких событиях (22 и 12 за первый и второй обороты активного комплекса, соответственно) представлены на сайте http://helios.izmiran.troitsk.ru/lars/Chertok/0310_11/index.html. Сайт организован в виде таблицы, где для каждого события, помимо даты, времени, балла, временного профиля мягкого рентгеновского излучения и координат соответствующей вспышки, можно видеть JAVASCRIPT-фильмы КВМ по данным SOHO/LASCO, а также фильмы оригинальных (не разностных), фиксированных

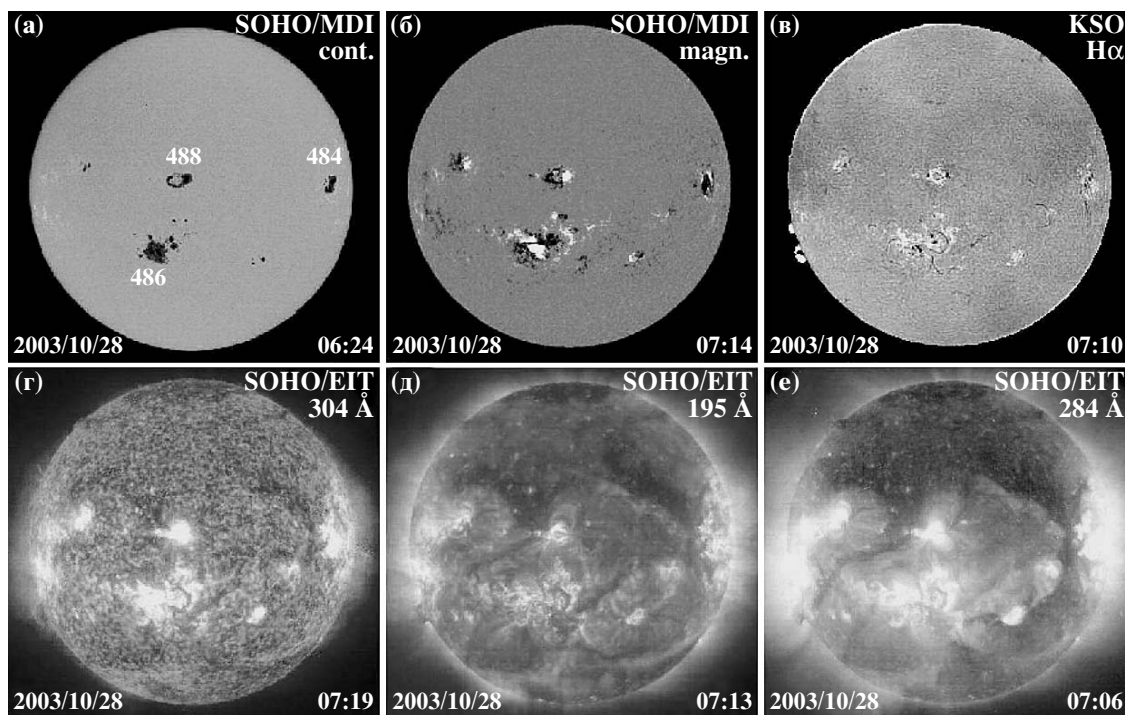


Рис. 1. Изображение солнечного диска в белом свете (а) и магнитограмма (б) по данным SOHO/MDI, H α -гелиограмма обсерватории KSO (в), УФ-гелиограммы SOHO/EIT в каналах 304 Å (г), 195 Å (д) и 284 Å (е), иллюстрирующие ситуацию на момент перед событием 28 октября 2003 г. Внизу справа на кадрах указано время UT.

разностных и последовательных разностных изображений в линии 195 Å по данным SOHO/EIT. Кроме того, для многих событий представлены фиксированные разностные изображения в четырех каналах 171, 195, 284, 304 Å и фильмы в линии H α , а для групп событий — сводные рисунки, иллюстрирующие ряд последовательных КВМ и связанную с ними крупномасштабную активность на диске, а также обусловленные ими возмущения космической погоды в виде возрастаний потока протонов, геомагнитных бурь и Форбуш-понижений галактических космических лучей.

3. АНАЛИЗ ЭРУПТИВНЫХ СОБЫТИЙ

Общая ситуация, в которой происходили рассматриваемые события, проиллюстрирована на рис. 1, где показан ряд гелиограмм за 28 октября. Изображения SOHO/MDI в континууме (рис. 1а) и на магнитограмме (рис. 1б) показывают, что на диске преобладали три крупные активные области: западная область AR 484 (каррингтоновская долгота $L = 354$) находилась чуть севернее гелиоэкватора, на широте N04, а две другие области — AR 486 и 488 — были удалены на 60°–70° к востоку ($L = 283$ и 291) и располагались примерно одна под другой на широтах S15 и N08, соответственно.

Самой большой по площади, сложной по структуре и наиболее вспышечно-активной была южная область AR 486. Именно в ней происходили вспышки с наиболее мощными рентгеновскими потоками. Как будет видно из дальнейшего, определенную роль в происходивших событиях играли и другие области, располагавшиеся вблизи и между тремя указанными областями, а также две удаленные области, которые 28 октября находились вблизи восточного лимба. Несмотря на то, что все эти области были значительно разнесены по долготе и располагались по разные стороны от гелиоэкватора, они были связаны между собой крупномасштабными магнитными полями и, в целом, образовывали единый глобальный активный комплекс. Судя по гелиограмме в линии H α (рис. 1в), темные волокна присутствовали, в основном, внутри и в окрестности активных областей, а на остальных участках диска крупных волокон не наблюдалось.

Гелиограммы SOHO/EIT в линии переходного слоя 304 Å (рис. 1г) и в корональных каналах 195 Å (рис. 1д) и 284 Å (рис. 1е) также свидетельствуют о концентрации активных областей в южной полусфере и приэкваториальной зоне северной полусферы. Большая же видимая часть северной полусферы к востоку от меридиана AR 484, как показывает, в частности, изображение в самой

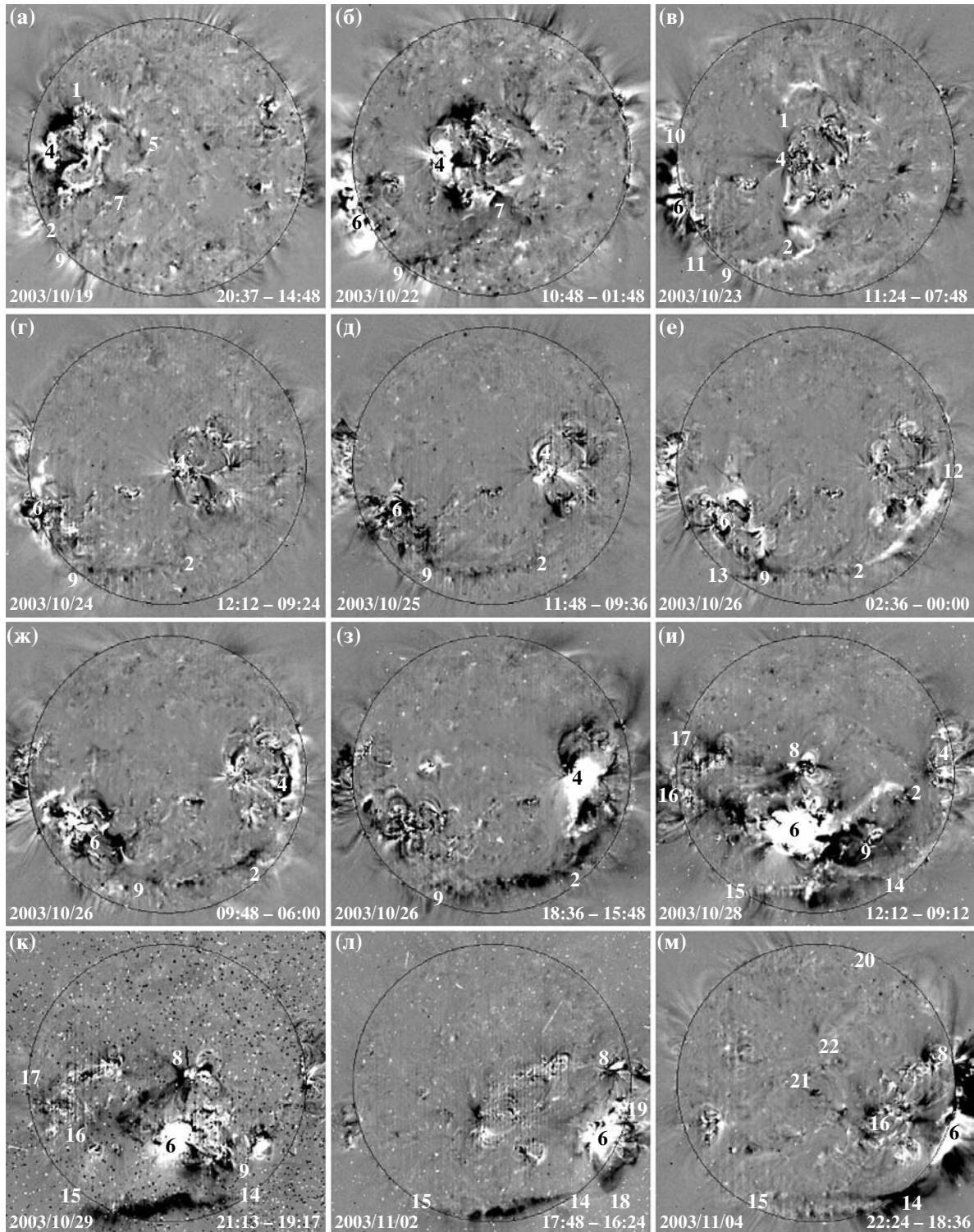


Рис. 2. Деротированные фиксированные разностные гелиограммы SOHO/EIT в канале 195 Å, показывающие крупномасштабные возмущения, в частности, димминги (темные структуры) в эруптивных событиях первого оборота с 19 октября по 4 ноября 2003 г. Для каждого события внизу кадра указаны дата, а также время UT исследуемого и вычитаемого изображений.

высокотемпературной линии 284 \AA (рис. 1е), была занята обширной корональной дырой с многочисленными яркими корональными точками и другими излучающими вкраплениями. В видимой части южной полусферы, особенно в полярном секторе, в линии 195 \AA (рис. 1д) видны узкие, протяженные светящиеся структуры, перемежающиеся участками с ослабленным УФ-излучением.

3.1. События первого оборота

На рис. 2 представлены фиксированные разностные изображения SOHO/EIT в линии 195 \AA , иллюстрирующие развитую фазу крупномасштабных возмущений для 12 самых значительных эруптивных событий первого оборота комплекса активных областей. Одно из первых событий такого рода произошло 19 октября в AR 484 (координаты N08 E58), когда остальные две крупные области находились еще за восточным лимбом. Оно включало в себя вспышку балла 1N/X1.1 с максимумом в $\sim 16:50 \text{ UT}$ и КВМ типа частичного гало с преобладающими петлеобразными структурами над северо-восточным лимбом. Судя по разностным фильмам, представленным на сайте, указанном в разделе 2, в интервале $16:43\text{--}17:22 \text{ UT}$ крупномасштабные возмущения в виде неглубоких распространяющихся диммингов и слабой корональной волны охватили почти всю восточную половину диска. Они наблюдались также над восточным лимбом. Наиболее глубокие (темные) димминги сформировались и существовали в течение нескольких часов вокруг яркой постэруптивной аркады 4 (рис. 2а). В меридиональном направлении, наряду с северным диммингом 4–1, наблюдался также южный трансэкваториальный димминг 4–2. В западном направлении димминговые ответвления огибали еще одно обширное уярчение и достигали точек 5, 7. Уже в этом событии видна узкая димминговая структура 7–9, простирающаяся в район юго-восточного лимба. Эта структура будет играть существенную роль и в последующих событиях.

Во многом аналогичная структура диммингов сложилась после нескольких эруптивных событий, имевших место в первой половине дня 22 октября в AR 484 (N04 E24) и восходящей из-за восточного лимба AR 496 (S21 E > 90). Наиболее значительными были вспышка балла M1.7 в $08:30 \text{ UT}$ и крупный КВМ над северным, южным и западными секторами лимба. На разностном изображении $10:48 \text{ UT}$ (рис. 2б) относительно фоновой гелиограммы $01:48 \text{ UT}$ выделяются компактная центральная (4) и протяженная прилиббовая юго-восточная (6) постэруптивные аркады. Основные димминги видны к северу, югу и западу от первой из них, что соответствует наблюдавшейся форме

КВМ. В данном событии становится ярко выраженным узкий димминговый канал 7–9, идущий от места пересечения юго-западных уярчения и диммингового ответвления к юго-восточному лимбу. Эта структура в числе других возмущений проявила себя и после первой из зарегистрированных в AR 486 значительной вспышки 22 октября ($20:07 \text{ UT}$, M9.9, S21 E90) и соответствующего крупного КВМ (см. сайт).

Еще одно мощное прилиббовое событие со вспышкой балла 1B/X5.4 и асимметричным петлеобразным КВМ произошло 23 октября после $08:24 \text{ UT}$ над той же областью AR 486 (S12 E88) (рис. 2в). Оно сопровождалось сначала возмущением типа корональной волны, распространявшемся вдоль восточного лимба, а затем отчетливым диммингом и протяженной постэруптивной аркадой над большим сегментом юго-восточного лимба 10–6–11. Возмущения и различные проявления активности охватили также весь юго-восточный квадрант и окрестности находившейся уже в центре диска области AR 484. Здесь, в частности, обозначился узкий меридиональный димминг 1–4–2 с ответвлением в район юго-восточного лимба 9 вдоль той же структуры, которая хорошо видна на кадре (б). Эта структура высвечивалась также проходящей по соседству с диммингом прерывистой излучающей цепочкой 9–2–4. В ходе события наблюдались несколько коллимированных выбросов (джетов) и диммингов, исходящих из центра AR 484 в восточном направлении, вдоль линии 4–10. В большей части северо-восточного квадранта, занятой КД, значительных возмущений не наблюдалось, а в северо-западном секторе диска образовался ряд диммингов и светящихся элементов.

Сходный симпатический характер активности в двух удаленных областях и аналогичные крупномасштабные возмущения в пространстве между ними имели место вслед за еще одной прилиббовой вспышкой 23 октября балла 1N/X1.1 ($20:04 \text{ UT}$, S17 E84) и повторным КВМ (см. сайт).

В ходе событий 24 октября, когда вспышки умеренных рентгеновских баллов от C5.7 до M7.6 и эруптивные явления поочередно происходили в AR 484 и AR 486, стало ясным, что упоминавшаяся выше юго-восточная структура визуализирует собой связь между двумя этими областями. В частности, на разностной EIT-гелиограмме, показанной на рис. 2г, эта структура имеет вид узкого димминга 4–2–9–6 с протяженным вдоль параллели отрезком в юго-восточном высокоширотном секторе диска.

Еще более отчетливо связь между AR 484 и AR 486 через указанную структуру стала видна после эруптивных событий 25 октября, в которых вспышки класса M1.2–M1.7 в интервале

~05–11 UT наблюдались как в западной, так и в восточной областях в комбинации с петлеобразным КВМ. Из рис. 2д можно видеть, что наиболее глубокий и протяженный димминг 4–2–9–6 ярко выражен и в данном событии и выглядит как узкая дуга с длиной, сопоставимой с диаметром диска, обращенная своей выпуклостью в сторону высоких широт южной полусферы. Удаленные области AR 484 и AR 486 связаны также более слабым, почти прямолинейным, фрагментарным диммингом 4–6. Еще несколько дополнительных диммингов исходит из восточной области в южном и восточном направлениях.

События 26 октября начались с эрупции волокна, располагавшегося к югу от AR 484. В течение 00:36–01:25 UT эруптирующее волокно хорошо видно, в частности, на помещенных на сайте EIT-фильмах в канале 195 Å в виде большой петли, поднимающейся над юго-западным лимбом и переходящей, по данным коронографа LASCO, в структурированный КВМ. Сразу же после эрупции на месте волокна образовалась протяженная постэруптивная аркада 2–12 (рис. 2е). Существенно, что эта аркада является продолжением все того же дугообразного димминга 2–9–6, идущего к AR 486, в которой так же, как и в AR 484, во время и после эрупции волокна продолжалась заметная активность. Узкое димминговое ответвление 9–13 достигает юго-восточного лимба.

В этот же день 26 октября имели место еще два эруптивных события с одинаковыми по баллу (X1.2) и продолжительности рентгеновского излучения вспышками и мощными КВМ типа гало. Первая вспышка с оптическим баллом 3В произошла в ~06:54 UT в восточной области AR 486 (S15 E44). Однако существенная активность наблюдалась в это время и в западной области AR 484, а между двумя этими областями развивался все тот же южный протяженный дугообразный димминг 6–9–2–4 (рис. 2ж). На соответствующих фильмах можно видеть корональную волну, распространяющуюся от центра эрупции в пределах северо-восточного квадранта диска.

Вторая вспышка 26 октября с оптическим баллом 1N произошла в ~18:19 UT уже в западной области AR 484 (N02 W38). В ходе этого события димминговая дуга 4–2–9 стала еще более отчетливой и заметно расширилась, в частности, за счет многочисленных темных элементов, обращенных к высоким широтам южного полушария (рис. 2з). В самой AR 484 сформировалась яркая постэруптивная аркада 4. На этот раз значительные возмущения и крупномасштабные димминговые структуры наблюдались также к западу и северу от аркады. В целом, они охватили обширные прилиббовую и надлиббовую зоны, простирающиеся от восточного лимба через южный полярный сектор

и западный лимб в район северного полюса. При этом северная часть центральной зоны диска снова оставалась почти невозмущенной. Данное событие стало первым, которое сопровождалось большим возрастанием потока протонов у Земли и появлением связанного с этим “снега” на изображениях EIT и LASCO от следов воздействия энергичных частиц на детекторы этих инструментов.

В течение 27 октября самыми большими были две вспышки балла 2F/M2.7 и SF/M5.0, которые с интервалом менее 1 ч (в 08:33 UT и 09:27 UT) произошли в западной и восточной областях AR 484 и AR 486 (см. сайт).

Самые значительные глобальные возмущения на диске в виде крупномасштабных диммингов и корональной волны имели место 28 октября после 11:10 UT. Они были связаны с мощнейшей вспышкой, которая произошла в уже находившейся в центральной зоне диска AR 486 (S16 E08) и характеризовалась оптическим баллом 4В и рентгеновским излучением, превысившим предельный для детекторов GOES уровень регистрации X17.2. В этом событии наблюдался один из самых высокоскоростных (2125 км/с в картинной плоскости) КВМ типа полного гало с равномерным кольцеобразным свечением вокруг всего затмевающего диска. Именно это событие явилось источником сильнейшей за первый оборот активного комплекса геомагнитной бури. Основному событию предшествовали значительные вспышечные уярчения, начавшиеся примерно в 10:00 UT в AR 486 и охватившие также находившуюся на близкой долготе, но к северу от гелиоэкватора область AR 488 (N08 E03) (см. сайт, рис. 1 и рис. 2и). Уярчения в этих областях сопровождалось формированием трансэкваториального димминга между ними и возмущениями, распространявшимися в восточном направлении. Вслед за основным энерговыделением в 11:10 UT в AR 486 наблюдалась корональная волна и сравнительно неглубокие распространяющиеся димминги, которые в этом случае, несмотря на наличие КД, охватили все северное полушарие. При этом наиболее глубокие и протяженные димминги развивались на всем пространстве южной полусферы (рис. 2и). Здесь южный димминг, который в предыдущих событиях соединял области AR 484 и AR 486, трансформировался в длинную димминговую структуру 6–9–2–4, заметно расширившуюся вблизи яркой постэруптивной аркады и несколько смещенную к северу относительно прежнего положения. Еще один узкий димминг 6–14, исходящий из центра эрупции, простирается в южный приполярный район, где он переходит в высокоширотный вытянутый вдоль параллели димминг 14–15, который, как видно из дальнейшего, будет доминировать в последующих событиях. В интервале 11:24–12:12 UT

из аркады в северо-западном направлении наблюдался выброс светящегося вещества 6–2, который на рис. 2и виден как структура, достигающая центральной части димминга 6–9–2–4.

Северо-западная и северо-восточная оконечности постэруптивной аркады 6 связаны трансэкваториальными диммингами с северной приэкваториальной областью AR 488. Картина глобальных возмущений в южной половине диска дополняется двумя полосами диммингов 6–16 и 8–17, идущими от обеих центральных областей в район восточного лимба.

На следующий день, 29 октября, примерно в 20:49 UT в той же области AR 486 (S15 W02) произошло еще одно мощное событие со вспышкой балла 2В/Х10 и почти таким же симметричным КВМ типа гало. В этом случае на гелиограммах, испещренных “снегом” от интенсивного потока ускоренных частиц, преобладает южный полярный димминг 14–15, сформировавшийся в ходе предыдущего события. Примыкающий к яркой постэруптивной аркаде западный димминг виден только на участке 6–9. Его восточная часть соединена с западным сектором южного полярного димминга 14–15 несколькими меридиональными элементами. К востоку от постэруптивной аркады, вдоль линии 6–16, выстраивается гряда фрагментарных диммингов. Связь между двумя центральными областями AR 486 и AR 488 обозначается трансэкваториальным диммингом 6–8. От северной из этих областей исходит диагональный димминг 8–16, а также фрагментарная димминговая структура 8–17, достигающая восточного лимба.

Следующие три дня были относительно спокойными. Наблюдались лишь два существенных эруптивных события, связанных со вспышками в AR 486 31 октября (17:20 UT, SF/C5.3, S20 W28) и 1 ноября (22:38 UT, 1N/M3.2, S12 W50). В обоих случаях заметные, но не столь крупномасштабные КВМ и димминги наблюдались западнее AR 486 (см. сайт).

Активность возобновилась 2 ноября в ~17:25 UT в виде вспышки балла 2В/Х8.3 в юго-западной области AR 486 (S14 W56) и крупного КВМ над западным лимбом с угловыми размерами ~180°. На разностных УФ-гелиограммах (рис. 2л), как и в событии 29 октября (рис. 2к), наряду с постэруптивной аркадой 6, преобладающим был южный полярный димминг 14–15. Непосредственно над аркадой располагался лимбовый димминг 18–19. Кроме того, возмущениями были охвачены окрестности северной приэкваториальной области AR 488 и весь сектор диска между этой областью и центральным меридианом. Севернее AR 488 в момент, близкий к максимуму вспышки, наблюдались

распространяющиеся возмущения с признаками корональной волны.

События 3 ноября были связаны уже с активностью в северной приэкваториальной области AR 488 (N09 W80), где в первой половине дня в 01:30 и 09:55 UT произошли две вспышки балла 2В/Х2.7 и 2F/Х3.9. Соответствующие КВМ наблюдались, в основном, над северо-западным лимбом. В обоих случаях УФ-гелиограммы и изображения КВМ оказались настолько сильно забиты “снегом” от ускоренных частиц, что на этом фоне крупномасштабные возмущения были едва различимы.

Мощнейшая по рентгеновскому баллу (зашкал на уровне X17.2 и оценочный максимум X28) вспышка имела место 4 ноября в ~19:53 UT в области AR 486, когда она находилась вблизи юго-западного лимба (S19 W83). В этом событии (рис. 2м) отчетливый димминг наблюдался над всем юго-западным лимбом, вокруг хорошо проявившейся постэруптивной аркады 6. Петлеобразный димминг 8–20, исходящий из AR 488, виден также над северо-западным лимбом. Угловые размеры крупного КВМ соответствуют диапазону позиционных углов, занимаемому прилимовыми диммингами. Здесь снова ярко выражен южный приполярный димминг 14–15, который в данном случае расщепился на две протяженные полосы. Существенно, что его западная оконечность 14 смыкается с основным диммингом над юго-западным лимбом, образуя единую глобальную димминговую структуру. Как в событии 2 ноября (рис. 2л), возмущения охватили также весь юго-западный квадрант, где видны, в частности, два димминговых канала 16–21 и 16–22, достигающих центральной зоны диска.

До сих пор мы рассматривали SOHO/EIT изображения в линии 195 Å. Метод деротации позволяет формировать и анализировать также разностные гелиограммы в остальных каналах 171, 284, 304 Å по данным с 6-ч интервалом. При таком интервале между гелиограммами надо иметь в виду, что не все события можно считать изолированными. К тому же гелиограммы через 1–2 ч после мощных западных событий, начиная с 28 октября, оказываются покрытыми “снегом” от потоков ускоренных частиц. С учетом этих ограничений одновременные разностные изображения в четырех линиях представлены на указанном выше сайте не для всех событий данной серии.

На рис. 3 в качестве примера такие гелиограммы приведены для двух событий первого оборота. В первом из них, вечернем событии 26 октября (рис. 3а–3г; см. также рис. 2з), разностные гелиограммы в трех корональных каналах (рис. 3б–3г) обнаруживают сходные по форме и локализации

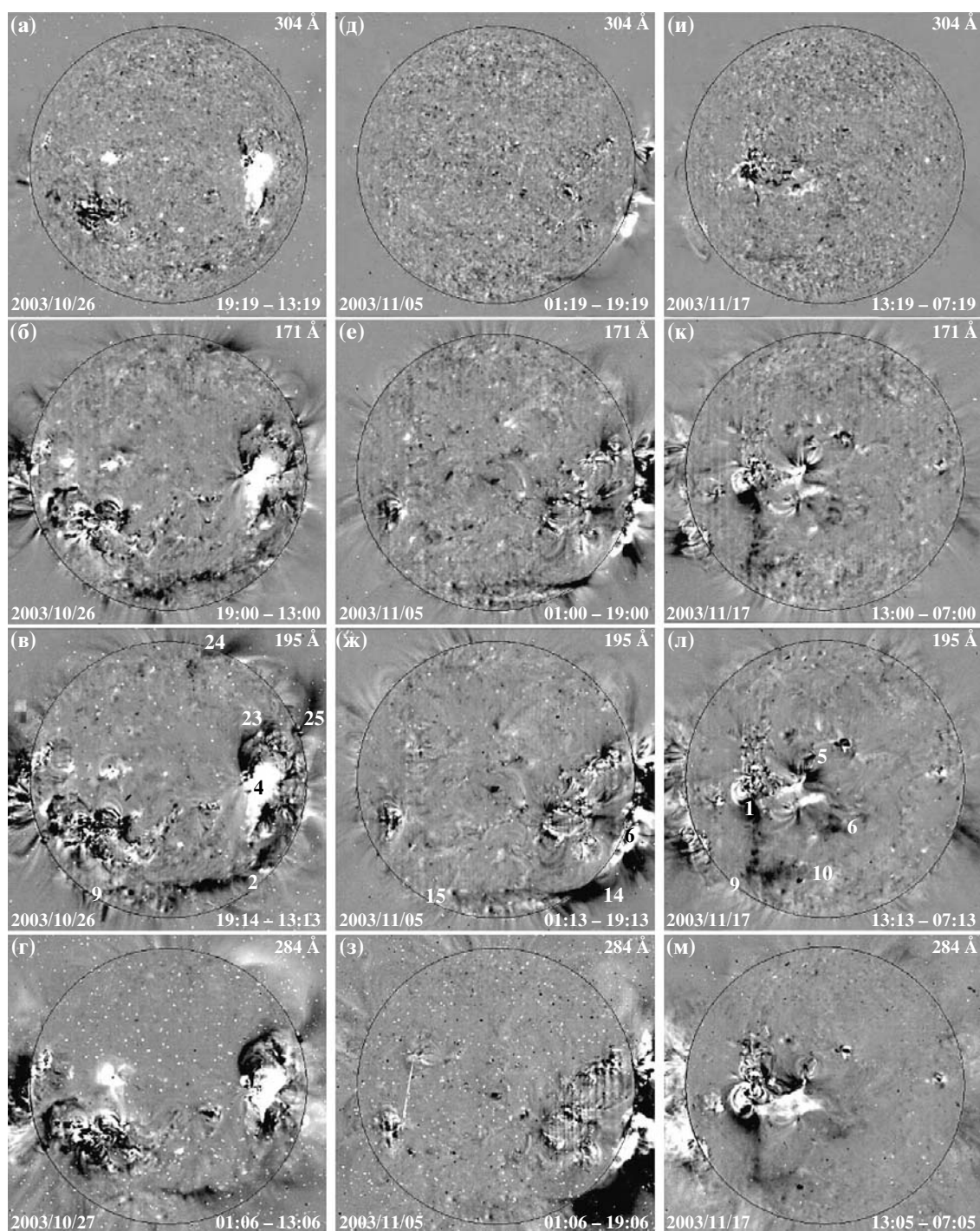


Рис. 3. Деротированные фиксированные разностные гелиограммы SOHO/EIT с 6-ч интервалами в четырех каналах 304, 171, 195 и 204 Å, иллюстрирующих димминги в линиях разной температуры для двух событий первого оборота — 28 октября (а–г) и 4 ноября (д–з) — и одного события второго оборота — 17 ноября 2003 г. (и–м). На кадре (г) представлено разностное изображение с 12-ч интервалом, поскольку гелиограмма на 284 Å, относящаяся к 19^h UT 26 октября, отсутствует.

димминговые структуры на диске: уже неоднократно упоминавшуюся протяженную южную дугу 4–2–9, а также расположенный к северу от пост-

эруптивной аркады димминг 4–23. В линии переходного слоя (рис. 3а) димминговая дуга проявляется только в виде слабых фрагментов, а у

северного димминга видна лишь часть, примыкающая к эруптивному центру 4. Что касается крупномасштабной петли над северо-западным лимбом, то ее северное основание 24 представляет собой димминг в корональных линиях низких (171 Å) и умеренных (195 Å) температур, а южное основание 25 — в корональных линиях умеренных и высоких (284 Å) температур. При этом в канале 284 Å большая часть северо-западной надлимбовой петли наблюдается в излучении. В этом же канале отчетливые димминги видны также над юго-западным лимбом.

Для второго события, 4 ноября (см. далее рис. 4м), на рис. 3д–3з показаны разностные гелиограммы в четырех каналах между 01^h UT 5 ноября и 19^h UT 4 ноября. Здесь гелиограммы на 171 Å (рис. 3е) и 195 Å (рис. 3ж) обнаруживают наличие в южном полярном секторе диска совпадающего димминга 14–15, вытянутого вдоль параллели. В линии переходного слоя 304 Å (рис. 3д) видна только западная часть этого димминга, а в высокотемпературной корональной линии 284 Å (рис. 3з) он почти незаметен. Зато здесь и, в меньшей степени, на 195 Å ярко выражен обширный димминг над юго-западным лимбом вокруг постэруптивной аркады 6. Южный фрагмент этого димминга виден также в канале 304 Å (рис. 3д). В целом, очевидно, что надлимбовый димминг и димминг на диске вдоль параллели образуют единую глобальную димминговую структуру.

3.2. События второго оборота

Значительная активность продолжалась и во время нахождения комплекса на невидимой полусфере. Об этом свидетельствует, в частности, тот факт, что в период с 6 по 12 ноября на коронографе LASCO было зарегистрировано много крупных КВМ без соответствующих проявлений на видимом диске, в том числе 5 КВМ типа гало (см. сайт). В первой половине второго прохождения комплекса по диску, с 13 по 20 ноября, наиболее активной была ведущая северная приэкваториальная область AR 501 (N03, $L = 002$), которая в предыдущем обороте нумеровалась как AR 484. Из двух последующих областей первого оборота AR 488 и AR 486 северная AR 507 (N10, $L = 295$) проявила себя 20 ноября, а южная AR 508 (S20, $L = 286$) стала источником крупных событий 27 ноября и 2 декабря, находясь уже вблизи западного лимба. В целом, события, наблюдавшиеся во время второго прохождения комплекса, были не столь значительными по сравнению с событиями первого оборота как по баллу вспышек, характеристикам КВМ, так и по сопровождавшим явлениям в

крайнем УФ-диапазоне (см. сайт). Об этом можно судить, в частности, по рис. 4, где, по аналогии с рис. 2, представлены деротированные фиксированные разностные гелиограммы SOHO/EIT в канале 195 Å для развитой фазы самых крупных эруптивных событий второго оборота.

Выход 13 ноября на восточный лимб первой из областей комплекса AR 501 ознаменовался двумя эруптивными событиями. Наиболее крупное из них было связано с длительной вспышкой балла M1.4 (09:29 UT, N04 E90) и КВМ типа частичного гало с ярким петлеобразным фронтом над восточным лимбом. Угловые размеры КВМ были порядка 180° и соответствовали размерам прилимбовой зоны, охваченной возмущениями на УФ-гелиограмме (рис. 4а). Обширные димминги и отдельные структуры в излучении развивались над лимбом вокруг протяженной постэруптивной аркады 1. На диске крупномасштабные возмущения в виде фрагментов корональной волны и диммингов (например, 1–2–3 и 1–4) наблюдались в прилегающем к восточному лимбу дугообразном секторе, который достигал центрального меридиана в южном и северном полярных районах.

Следующее значительное событие произошло в той же области AR 501 (S01 E33) 17 ноября в 09:05 UT в связи со вспышкой балла 1N/M4.2 и еще одним юго-восточным КВМ типа частичного гало. На УФ-гелиограмме (рис. 4б) к западу от основного очага вспышки 1 проявляется ряд дополнительных светящихся полос и дуг, окруженных диммингами 5, 6. Основной протяженный димминг развивался сначала в южном направлении (1–9), а затем дополнился западным ответвлением 9–10. На соответствующих фильмах (см. сайт) в обширной зоне, достигающей юго-западного лимба, видны также относительно слабые возмущения с признаками корональной волны. Особенностью КВМ (см. сайт) в данном случае было то, что наибольшую яркость у него имела не головная часть фронта, а западная кромка. Это, по-видимому, обусловлено тем, что именно эта кромка КВМ является продолжением основного южного димминга 1–9–10, из которого была выброшена основная масса вещества.

Наибольший интерес вызывает событие, происшедшее 18 ноября в виде продолжительной оптической вспышки балла 2N в AR 501 (N08 E18) с двумя рентгеновскими всплесками балла M3.2 и M3.9 в 07:52 и 08:31 UT; третий, дополнительный рентгеновский всплеск балла M4.5 с максимумом в 10:11 UT отождествляется с активностью на восточном лимбе. Соответствующий КВМ также был многокомпонентным. Сначала над юго-восточным лимбом наблюдался относительно слабый КВМ, у которого, подобно КВМ 17 ноября, наиболее

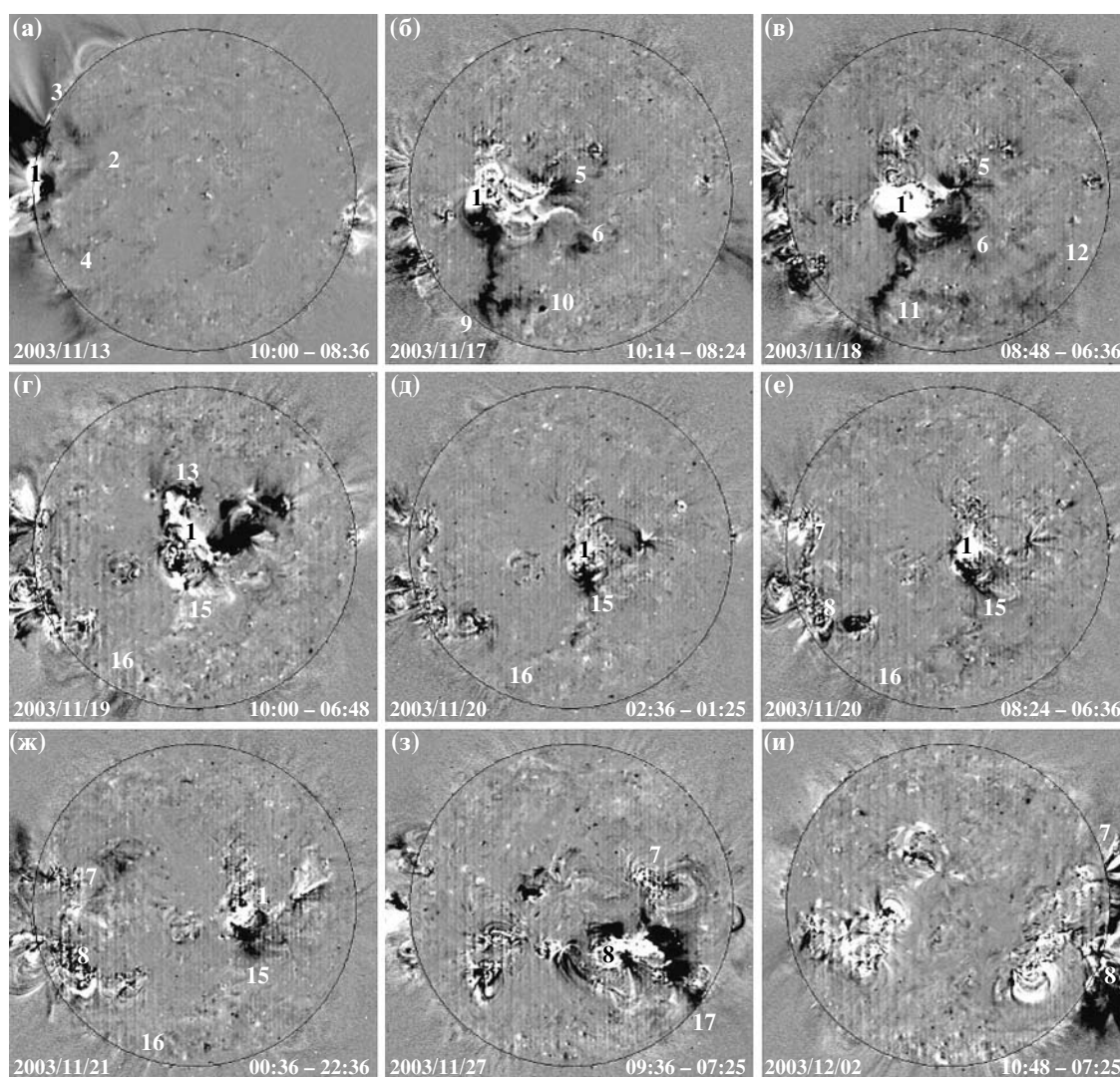


Рис. 4. Деротированные фиксированные разностные гелиограммы SOHO/EIT в канале 195 Å, показывающие димминги в эруптивных событиях второго оборота с 13 ноября по 2 декабря 2003 г.

яркой была западная часть фронта. Затем, после ~08:40 UT, гораздо более яркий, высокоскоростной, крупномасштабный КВМ типа частичного гало развивался над южным и юго-западным лимбом. Несмотря на умеренный балл вспышки, именно это событие явилось причиной самой сильной геомагнитной бури 20 ноября с $D_{st} \approx -465$ нТл. В данном случае эрупция КВМ сопровождалась существенными УФ-возмущениями почти на всей южной половине диска (рис. 4в). Как и в событии 17 ноября, глубокие димминги 5, 6 образовались в западной окрестности эруптивного центра 1. Но основной протяженный димминг 1–9, соответствующий первому КВМ, по-прежнему простирался в район южного/юго-восточного лимба. Перед появлением второго мощного КВМ в течение нескольких десятков минут во всем юго-восточном квад-

ранте фиксировалась сложная система стационарных и распространяющихся от эруптивного центра возмущений. Некоторые из образовавшихся здесь фрагментарных и концентрических дугообразных диммингов (например, 11–12) видны на рис. 4в, а проявления корональной волны лучше всего можно видеть на фильме последовательных разностных изображений (см. сайт). Еще один, третий крупный КВМ, наблюдавшийся над юго-восточным лимбом после 09:26 UT, вероятно, обусловлен активностью в примыкающем секторе невидимой полусферы, проявления которой на гелиограммах EIT видна также над самим лимбом.

В отличие от предшествующих событий, вспышка балла 1F/C8.8 произошла 19 ноября в 08:17 UT не в южной, а в северной части области AR 501 (N08 E01) (рис. 4г). В соответствии с этим, протяженная постэруптивная аркада 1, примыкающие

к ее торцам димминги 13 и 14, сопровождающие возмущения и сравнительно небольшой петлеобразный КВМ наблюдались, в основном, к северу от гелиоэкватора, в северо-западном секторе диска и над северо-западным лимбом. При этом южная половина диска затрагивалась незначительно: здесь, в частности, высвечивалась юго-восточная структура 15–16, положение которой совпадает с основным протяженным южным диммингом, проявлявшимся во многих событиях первого оборота комплекса.

Эта же структура 1–15–16, идущая от эруптивного центра в сторону юго-восточного лимба и, возможно, далее к появившейся на диске южной области AR 508, обозначилась в виде относительно слабых фрагментарных диммингов в нескольких не слишком значительных событиях 20–21 ноября (рис. 4д–ж). Основные димминги в этих событиях наблюдались в южной окрестности центральной области AR 501 (N03 W10), где имели место кратковременные вспышки с рентгеновским баллом от C8.8 до M9.6 в сочетании с небольшими КВМ и слабыми возмущениями в юго-западном секторе.

Еще одно заметное событие со вспышкой балла C8.6 наблюдалось 20 ноября в 19:29 UT в северной области AR 507 (N09 E58). Оно сопровождалось развитием возмущений вокруг этой области, в том числе трансэкваториальных диммингов между AR 507 и AR 508 (см. сайт).

В самой же южной области AR 508 два последних крупных события данной серии произошли только при ее приближении к юго-западному лимбу. Первое из них (рис. 4з) имело место 27 ноября в 08:20 UT после продолжительной вспышки балла SF/C9.6 (S14 W37) и сравнительно небольшого по угловым размерам юго-западного КВМ. Соответствующие димминги формировались вокруг постэруптивной аркады 8, простирались к северной области 7 и достигали юго-западного лимба 17.

Заключительное событие 2 декабря в 09:48 UT (рис. 4и) было лимбовым (S14 W90) и включало в себя вспышку балла C7.2 с длительным всплеском мягкого рентгеновского излучения, а также крупный юго-западный КВМ. В этом случае димминги наблюдались, в основном, над лимбом и охватывали тот же угловой сектор, что и КВМ, от северной области 7 до южного полярного района. На фоне этих диммингов из окрестности каждой из двух лимбовых областей 7 и 8 исходили узкие светящиеся структуры.

Об особенностях диммингов в разных линиях в событии 17 ноября (рис. 4б) можно судить по 6–ч разностным гелиограммам, представленным на рис. 3и–3м. Основной меридиональный димминг 1–9 и его западное ответвление 9–10, как и димминги 5, 6, примыкающие к эмиссионным лентам вблизи эруптивного центра, одинаковым образом

проявляют себя в трех корональных каналах 171, 195, 284 Å (рис. 4к–м). Более того, относительно слабые аналоги этих диммингов (в частности, основного димминга 1–9–10) имеются и на гелиограмме в канале 304 Å (рис. 4и).

4. ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ УФ-гелиограмм SOHO/EIT с использованием процедур компенсации вращения солнечного диска и формирования деротированных фиксированных разностных изображений позволил выявить ряд особенностей крупномасштабной активности в серии мощных эруптивных событий октября–ноября 2003 г. Основными из них являются глобальный характер активности в едином комплексе, состоящем из трех крупных групп пятен, и гомология диммингов, сопровождающих эрупцию многочисленных КВМ типа гало.

Глобальный характер активности проявлялся, в частности, в том, что вызываемые КВМ возмущения во многих событиях охватывали значительную часть солнечной магнитосферы. При этом некоторые димминги с пространственным масштабом, сопоставимым с радиусом и даже диаметром солнечного диска, охватывали почти всю южную полусферу и наблюдались в виде протяженных структур, соединяющих удаленные активные области, в том числе расположенные по разные стороны от гелиоэкватора. Наиболее значительным из таких диммингов была южная дугообразная структура 4–2–9–6 (рис. 2). Наличие таких диммингов указывает на магнитную связь между областями, входящими в состав наблюдавшегося комплекса. К этому следует добавить, что некоторые события сопровождалось корональными волнами, которые, в противоположность диммингам, распространялись, в основном, через северную половину диска. В целом, это свидетельствует о том, что в процесс эрупции КВМ часто оказывалась вовлеченной вся видимая часть глобальной солнечной магнитосферы.

Под крупномасштабной гомологией понимается то, что в повторяющихся эруптивных событиях значительным диммингам подвергались одни и те же магнитные структуры значительных пространственных размеров. Гомологичные димминги в трансэкваториальных петлях, связанные со вспышками и КВМ в начале мая 1998 г., проанализированы в [29]. В [30] описаны гомологичные крупномасштабные возмущения (димминги и корональные волны) в серии эруптивных событий конца ноября 2000 г., связанных с одной активной областью. Существенной особенностью данной серии событий во время первого оборота комплекса из трех активных областей были не только гораздо больший пространственный масштаб диммингов,

но и наблюдавшаяся в ходе мощнейшего события 28 октября перестройка от одной гомологической системы диммингов к другой (рис. 2; эта перестройка хорошо видна также на фильме, представленном на упоминавшемся сайте). Если до этого в ряде событий преобладающей была все та же протяженная димминговая дуга 4–2–9–6, то в последующих событиях явно доминировал южный приполярный димминг 14–15, вытянутый вдоль параллели. Во втором обороте с не столь мощной активностью гомологичными, по-видимому, можно считать южные меридиональные димминги 1–9, наблюдавшиеся, в частности, в событиях 17 и 18 ноября (рис. 4). Возникновение крупномасштабных гомологичных диммингов в повторяющихся событиях означает, во-первых, что процесс эрупции последовательных КВМ затрагивает одни и те же структуры глобальной солнечной магнитосферы и, во-вторых, что эти структуры за время порядка 10–15 ч между соседними КВМ успевают восстановить свою светимость в крайнем УФ-диапазоне.

Анализ показал также, что во многих событиях основные димминги проявляются почти одинаковым или сходным образом не только в трех корональных линиях 171, 195, 284 Å, но и в линии переходного слоя 304 Å (ср. [27]). При этом следует иметь в виду, что димминги, наблюдаемые в непосредственной близости от эруптивного центра (активной области) в линии 304 Å, могут быть частично обусловлены ослаблением излучения в корональной линии Si XI, которая также фиксируется фильтром 304 Å [3, 25]. Совпадение диммингов в линиях с разной температурой возбуждения обычно рассматривается как свидетельство в пользу сделанного ранее вывода [6, 7, 10], что такие димминги образуются в результате происходящего в связи с КВМ частичного или полного раскрытия силовых линий в соответствующих магнитных структурах и истечения плазмы из них. Прямые свидетельства истечения вещества из диммингов, расположенных вблизи эруптивного центра, получены в [12] по доплеровскому сдвигу нескольких линий, регистрируемых на спектрометре SOHO/CDS [31]. Однако заключение о преобладающей роли раскрытия силовых линий нуждается в дополнительном обосновании, поскольку, как показывают наблюдения, в том числе и событий данной серии, структуры, подвергшиеся диммингам, часто остаются видимыми в излучении, хотя сильно ослабленном, и после КВМ. Не совсем ясно также, как согласовать частичное или полное раскрытие силовых линий в димминговых структурах с довольно быстрым восстановлением их светимости в гомологических событиях. К этому стоит добавить, что, наряду с совпадающими, наблюдаются димминги, которые по-

разному проявляются как в разных корональных линиях, так и в линии переходного слоя [27]. Это указывает на то, что в таких структурах понижение интенсивности крайнего УФ-излучения в одних линиях и отсутствие такого понижения или даже некоторое усиление в других линиях могут быть инициированы изменениями температуры плазмы, например, за счет нагрева под действием тепловых или МГД-возмущений, связанных с эрупцией КВМ. По-видимому, формирование диммингов обусловлено сложной совокупностью различных факторов, в число которых, кроме раскрытия силовых линий и вариаций температуры, могут входить также деформация магнитных структур, изменения потока вещества из хромосферы в корональные петли под действием КВМ и т.д.

Что касается общей характеристики активности в событиях октября–ноября 2003 г., то из различных наблюдений следует, что мы имеем дело с беспрецедентным по мощности, глобальным всплеском активности, который проявился в одновременном всплытии из-под фотосферы трех мощных магнитных потоков, образовавших три удаленные друг от друга, но связанные между собой крупные группы пятен. Эволюция локальных и крупномасштабных магнитных полей в этом глобальном комплексе привела к возникновению серии аналогичных по характеру, мощных вспышек и значительных КВМ, которые сопровождалась гомологичными крупномасштабными возмущениями в солнечной атмосфере. Причины возникновения такой сильной флуктуации активности на фазе спада 11-летнего цикла остаются неясными.

Авторы благодарны коллективу SOHO/EIT за данные, использованные при анализе; SOHO — проект международного сотрудничества ESA и NASA. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 03-02-16049 и 03-02-16591) и Министерства образования и науки РФ (гранты НШ-477.2003.2, НШ-1445.2003.2), а также Программы фундаментальных исследований Президиума РАН “Нестационарные процессы в астрономии”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. G. E. Brueckner, R. A. Howard, M. J. Koomeen, *et al.*, *Solar Phys.* **162**, 357 (1995).
2. И. С. Веселовский и 74 соавтора, *Космич. исслед.* **42** (2004, в печати).
3. J.-P. Delaboudinière, G. E. Artzner, J. Brunaud, *et al.*, *Solar Phys.* **162**, 291 (1995).
4. A. C. Sterling and H. S. Hudson, *Astrophys. J.* **491**, L55 (1997).
5. H. S. Hudson and D. F. Webb, in *Coronal Mass Ejections*, eds N. Crooker, J. Joselyn, and J. Feynman, AGU Geophysical Monograph Series, No. 99, 27 (1997).

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. D. F. Webb, *J. Atmosph. and Solar-Terr. Phys.* **62**, 1415 (2000).
9. A. S. Sterling, *J. Atmosph. and Solar-Terr. Phys.* **62**, 1427 (2000).
10. N. Gopalswamy and B. J. Thompson, *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* **62**, 1458 (2000).
11. H. S. Hudson and E. W. Cliver, *J. Geophys. Res.* **106**, 25199 (2001).
12. L. K. Harra and A. C. Sterling, *Astrophys. J.* **561**, L215 (2001).
13. S. W. Kahler and H. S. Hudson, *J. Geophys. Res.* **106**, 29239 (2001).
14. S. Tsuneta, L. Acton, M. Bruner, *et al.*, *Solar Phys.* **136**, 37 (1991).
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. Vršnak, 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. G. E. Moreton and H. E. Ramsey, *Publs Astron. Soc. Pacif.* **72**, 357 (1960).
23. C. Delannée and G. Aulanier, *Solar Phys.* **190**, 107 (1999).
24. C. Delannée, *Astrophys. J.* **545**, 512 (2001).
25. D. Moses, F. Clette, J.-P. Delaboudinière, *et al.*, *Solar Phys.* **175**, 571 (1997).
26. И. М. Черток, В. В. Гречнев, *Астрон. журн.* **80**, 162 (2003).
27. И. М. Черток, В. В. Гречнев, *Астрон. журн.* **80**, 1013 (2003).
28. I. M. Chertok and V. V. Grechnev, *Solar Phys.* (2004, in press).
29. J. I. Khan and H. S. Hudson, *Geophys. Res. Lett.* **27**, 1083 (2000).
30. I. M. Chertok, V. V. Grechnev, H. S. Hudson, and N. V. Nitta, *J. Geophys. Res.* **109**, A02112, doi:10.1029/2003JA010182 (2004).
31. R. A. Harrison, E. C. Sawyer, and M. K. Carter, *Solar Phys.* **162**, 233 (1995).

Large-Scale Activity in Solar Eruptive Events Observed with SOHO/EIT During October–November 2003

I. M. Chertok and V. V. Grechnev

Large-scale solar events related to powerful flares and coronal mass ejections (CMEs) during two passages of a grand system of three active regions in October–November 2003 are analyzed using SOHO/EIT UV data. Dimmings (transient coronal holes) and, to a lesser extent, coronal waves (traveling radiating fronts) are studied using derotated difference images that have been corrected for the solar rotation and from which a single heliogram preceding the event is subtracted from all subsequent heliograms. This method provides residual heliograms in both the 195 Å line (with an interval of 12 min) and the various-temperature channels corresponding to the 171, 195, 284, and 304 Å lines (with an interval of 6 h). Our analysis shows that processes related to CMEs demonstrated a global character and occupied almost the entire southern half of the disk in virtually all eruptive events during two solar rotations. At the same time, the northern half of the disk, which displayed a large coronal hole, was only slightly disturbed. The dominant dimmings were observed on the disk as narrow, long elements stretched mainly between three main distant regions of the system and as long structures located along parallels in the southern polar sector. For events that repeated at short time intervals, the dominant dimmings demonstrated a clear homology in their shapes and locations. During the very powerful event of October 28, one homologous global set of dimmings was replaced by another set. Numerous dimmings were observed to be identical or similar in the three coronal channels and the transition-layer line. Rapidly recovering global structures in the corona and transition layer were involved in the eruption of successive CMEs and the corresponding reconstruction of the large-scale magnetic fields.