

УДК 523.985-866

КРУПНОМАСШТАБНАЯ АКТИВНОСТЬ В СОЛНЕЧНЫХ МОЩНЫХ ЭРУПТИВНЫХ СОБЫТИЯХ НОЯБРЯ 2004 г. ПО ДАННЫМ SOHO

© 2006 г. И. М. Черток

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

Поступила в редакцию 10.06.2005 г.; принята в печать 06.07.2005 г.

По данным УФ-телескопа SOHO/EIT и коронографа LASCO проанализированы крупномасштабные солнечные возмущения, связанные с серией мощных вспышек и корональных выбросов массы, которые произошли 3–10 ноября 2004 г., на поздней фазе спада 23-го цикла и вызвали сильные геомагнитные бури. С использованием деротированных фиксированных разностных гелиограмм в корональном канале 195 \AA с 12-мин интервалом, а также в разнотемпературных каналах 171, 195, 284 и 304 \AA с 6-ч интервалом показано, что эти возмущения имели глобальный характер и были гомологичными, т.е. обладали аналогичными характеристиками и затрагивали одни и те же структуры. Практически во всех 9 событиях данной серии наблюдались две повторяющиеся системы крупномасштабных диммингов (областей пониженной яркости с временем жизни порядка 10–15 ч): (а) трансэкваториальные димминги, соединяющие северный приэкваториальный центр эрупции с южной активной областью; (б) северные димминги, охватывающие значительный сектор между двумя корональными дырами. В этом же северном секторе перед расширяющимися диммингами наблюдались корональные волны — уярчения, распространявшиеся от центра эрупции со скоростью сотни км/с. В каждом событии наиболее яркая центральная часть коронального выброса массы типа гало соответствовала северной системе диммингов. На основе полученных результатов обсуждаются свойства диммингов и корональных волн, а также связь между ними, и показано, что в процесс эрупции крупных корональных выбросов массы оказываются вовлеченными структуры глобальной солнечной магнитосферы с пространственным масштабом, намного превосходящим размеры активных областей и обычных комплексов активности.

1. ВВЕДЕНИЕ

Фаза спада 23-го солнечного 11-летнего цикла характеризуется рядом сильных всплесков активности, которые включали в себя серии мощных вспышек и крупных корональных выбросов массы (КВМ), сопровождавшихся значительными межпланетными и геофизическими возмущениями, в том числе в виде сильнейших геомагнитных бурь и интенсивных потоков энергичных частиц. Такие всплески активности имели место, в частности, в октябре–ноябре 2003 г., в ноябре 2004 г. и в январе 2005 г.

Различные аспекты беспрецедентно высокой активности октября–ноября 2003 г., наблюдавшейся во время двух проходов по диску комплекса из трех крупных активных областей, исследовались во многих работах (см., например, [1, 2]). В [3, 4] по данным телескопов крайнего УФ-диапазона SOHO/EIT [5] и КОРОНАС-Ф/СПИРИТ [6] проанализированы

солнечные проявления этой активности с пространственным масштабом, сравнимым с радиусом и даже диаметром видимого диска. Речь идет, в частности, о таких связанных с КВМ крупномасштабных явлениях, как димминги и корональные волны. Напомним, что димминги или транзитные корональные дыры [7–13] представляют собой области пониженной яркости 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, кроме того, могут охватывать значительную часть солнечного диска. Димминги визуализируют структуры, вовлеченные в процесс КВМ, и интерпретируются, в основном, как результат полного или частичного раскрытия (вытягивания) корональных магнитных полей внутри этих структур в процессе КВМ, что приводит к эвакуации вещества и соответствующему уменьшению интенсивности излучения. Корональ-

ная волна — это уярчение, которое распространяется от центра эрупции со скоростью порядка нескольких сотен км/с и может наблюдаться перед развивающимися диммингами или независимо от них [3, 4, 13–18]. Такая волна рассматривается или как МГД-возмущение, являющееся корональным аналогом хромосферной волны Мортонa, наблюдаемой в линии $H\alpha$ [19], или как следствие сжатия плазмы на распространяющейся границе диммингов, т.е. областей открывающихся силовых линий магнитного поля [20–22].

Настоящая работа посвящена анализу КВМ, крупномасштабных диммингов и корональных волн в серии эруптивных событий ноября 2004 г. по данным коронографа белого света SOHO/LASCO [23] и УФ-телескопа SOHO/EIT. Помимо рассмотрения характеристик крупномасштабных проявлений КВМ в данной серии активности, целью анализа является получение новой информации о свойствах диммингов и корональных волн, о связи между ними, о гомологии этих возмущений в повторяющихся событиях и т.д. В разделе 2 представлены общие свойства активности и используемый метод анализа данных телескопа EIT и коронографа LASCO. В разделе 3 рассмотрены некоторые характеристики основных КВМ. Затем в разделе 4 анализируются четыре наиболее мощные и показательные события с крупномасштабными (глобальными) гомологичными возмущениями на диске. В разделе 5 обсуждаются полученные результаты, в том числе свойства диммингов и корональных волн и сравнение данного всплеска активности с другими сериями мощных эруптивных событий.

2. ХАРАКТЕРИСТИКА АКТИВНОСТИ И МЕТОД АНАЛИЗА

Рассматриваемый всплеск солнечной активности и сопровождавшие его возмущения космической погоды в ноябре 2004 г. (см. обзорную статью [24]) были связаны с быстрым развитием на диске области 696 (каррингтоновские координаты N09, L = 026) (рис. 1). По данным, приведенным в Preliminary Report and Forecast of Solar Geophysical Data (<http://www.sel.noaa.gov/weekly/pdf/prf1523.pdf> и <http://www.sel.noaa.gov/weekly/pdf/prf1524.pdf>), в период с 1 (гелиодолгота E63) по 6 (W08) ноября площадь пятен в этой области возросла от 60 до 910 м.д.п. (миллионные доли полусферы), число пятен в ней увеличилось с 6 до 33, а магнитная конфигурация, соответственно, усложнилась от простой (β) до вспышечно продуктивной ($\beta\gamma\delta$). После 6 ноября число и площадь пятен начали уменьшаться с повторным возрастанием 8 ноября до 48 по количеству

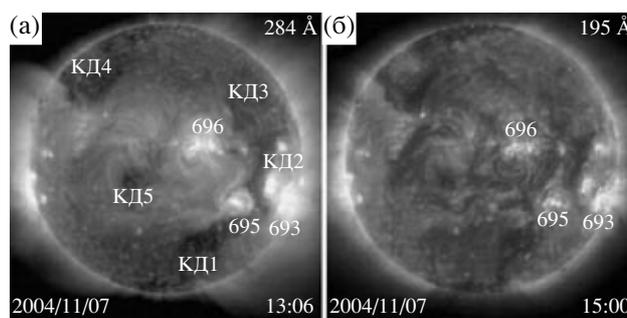


Рис. 1. Гелиограммы SOHO/EIT в каналах крайнего УФ-диапазона 195 Å (а) и 284 Å (б), иллюстрирующие ситуацию на диске (локализацию активных областей и корональных дыр (КД)) 7 ноября 2004 г.

и 9 ноября до 730 м.д.п. по площади пятен, соответственно. Как будет видно из дальнейшего, в процесс эрупции КВМ и формирования диммингов была вовлечена также расположенная несколько западнее области 696 и к югу от гелиоэкватора область 695 (S14, L = 045) и, возможно, еще юго-западная область 693 (S14, L = 076). Большую роль играли также корональные дыры (КД), особенно те, которые занимали обширную площадь в северной полусфере (КД3, КД4), и узкая трансэкваториальная КД2, которая располагалась к западу от структуры, соединяющей области 696 и 695 (рис. 1).

Бурная эволюция области 696 сопровождалась высокой вспышечной активностью. За время прохождения области по диску произошли 13 вспышек рентгеновского балла M и 2 вспышки балла X. Указанная высокая вспышечная активность сочеталась с весьма значительной эруптивной активностью. В период с 3 по 10 ноября на коронографе SOHO/LASCO было зарегистрировано большое число крупных КВМ, в том числе 9 КВМ типа гало со свечением вокруг значительной части или всего затмевающего диска коронографа.

Следуя [3, 11, 12, 25], при анализе диммингов и корональных волн в крайнем УФ-диапазоне по данным EIT использован метод фиксированных деротированных разностных изображений, которые формируются в два этапа. Сначала компенсируется вращение Солнца (деротация) посредством трехмерного поворота проекции на картинную плоскость сферической поверхности Солнца в пределах диска к одному и тому же моменту времени для всех кадров. Затем одно и то же фоновое изображение перед событием вычитается из всех последующих гелиограмм. Это позволяет по данным EIT исследовать развитие диммингов на протяжении многих часов не только в канале 195 Å по изображениям, получаемым с интервалом 12 мин,

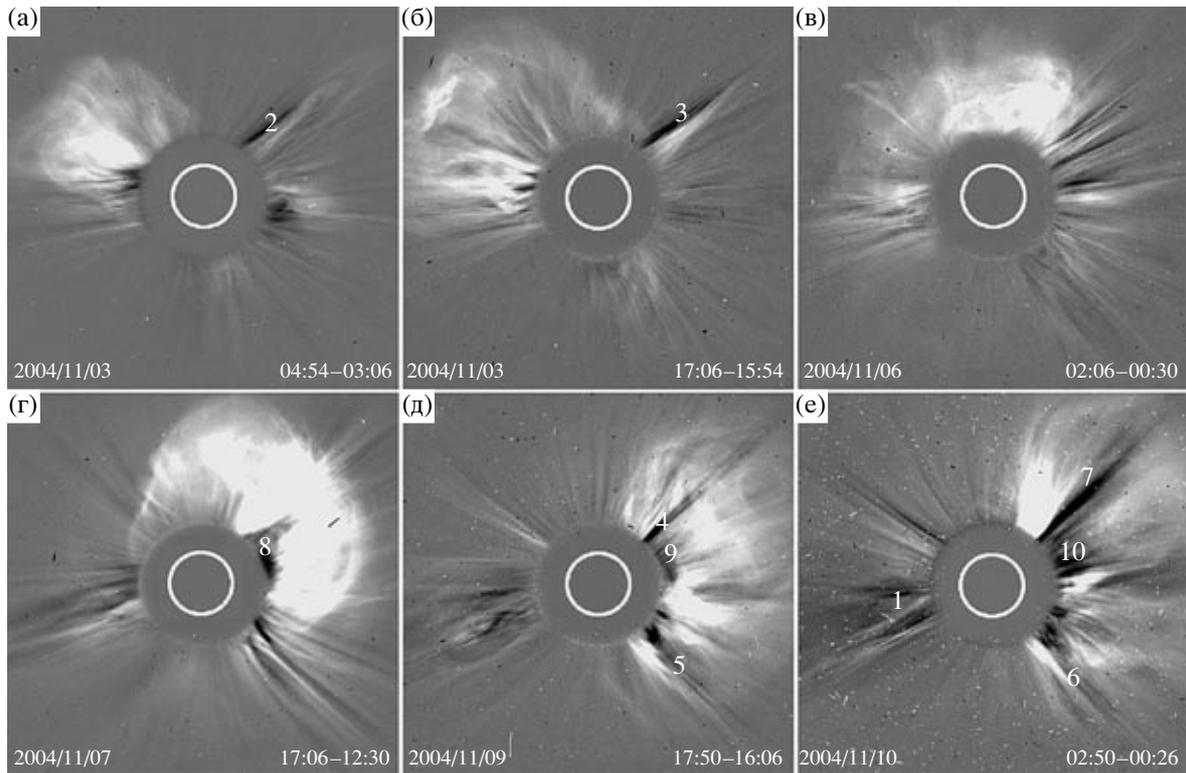


Рис. 2. Фиксированные разностные изображения корональных выбросов массы в 6 эруптивных событиях ноября 2004 г. по наблюдениям коронографа белого света SOHO/LASCO/C2. Для каждого события внизу приведены дата, а также время рассматриваемого и вычитаемого изображений (UT).

но и по гелиограммам в двух других корональных каналах 171 и 284 Å, а также в канале переходного слоя 304 Å, которые фиксируются с интервалом 6 ч. Напомним, что корональные каналы 171, 195 и 284 Å чувствительны к плазме с температурой 1.2, 1.5 и 2.0 МК, а канал 304 Å содержит линию переходного слоя He II (0.08 МК) и менее интенсивную корональную компоненту Si XI (1.6 МК) [5].

Фиксированные деротированные разностные изображения принципиально отличаются от широко используемых последовательных разностных изображений. Последние формируются вычитанием из каждого изображения предшествующего ему кадра. Такие изображения, по существу, представляют собой производную вариаций яркости и по этой причине не показывают реальной пространственной структуры возмущений, хотя и оказываются полезными, например, при индикации фронта корональных волн.

В данной работе фиксированные разностные изображения (но уже без деротации) использованы также для индикации КВМ по данным двух коронографов LASCO на гелиоцентрических расстояниях от 2.5 до 32 R_{\odot} . Такие изображения позволяют видеть развитие КВМ в картинной плоскости в

сравнении с фоновым изображением короны до эрупции. Исходные FITS файлы взяты из каталога EIT (<http://umbra.nascom.nasa.gov/eit/eit-catalog.html>) и каталога LASCO (<http://lasco-www.nrl.navy.mil/cgi-bin/lwdb/lasco/images/form>). Из-за ограниченного объема статьи ниже приводятся самые необходимые иллюстрации. Различные дополнительные материалы к рассматриваемым событиям в виде изображений и компьютерных фильмов представлены на сайте http://helios.izmiran.troitsk.ru/lars/Chertok/04_11/index.html.

3. КОРОНАЛЬНЫЕ ВЫБРОСЫ МАССЫ

На рис. 2 приведены фиксированные разностные изображения шести из девяти КВМ типа гало, зарегистрированных при помощи коронографа LASCO/C2 в период 3–10 ноября 2004 г. Вид этих КВМ в картинной плоскости указывает на их крупномасштабный и даже глобальный характер. Уже на расстояниях несколько R_{\odot} от Солнца линейные размеры КВМ превышают диаметр видимого диска во много раз. При этом наиболее яркие петлеобразные структуры КВМ занимают большой диапазон позиционных углов от нескольких десятков до почти 180°. По мере прохождения

области 696 по диску, а также в связи с локализацией наиболее значительных диммингов (см. ниже), эти яркие структуры КВМ перемещались с северо-восточного к северному, а затем к северо-западному сектору околосолнечного пространства. Наблюдавшееся свечение вокруг других секторов лимба свидетельствует о значительных угловых размерах КВМ и о возможной существенной составляющей их распространения в направлении, перпендикулярном картинной плоскости, в данном случае в направлении Земли.

По данным двух коронографов LASCO/C2 и C3 (http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/), три КВМ, наблюдавшиеся 3–6 ноября (рис. 2а–в), когда основной источник эрупции (область 696) находился на восточной половине диска, имели в картинной плоскости умеренную скорость от 650 до 1050 км/с. Самой большой скоростью от 1760 до >2500 км/с обладали три КВМ (рис. 2г–е), которые произошли 7, 9 и 10 ноября при приближении источника эрупции к западному лимбу.

Благодаря специфике фиксированных разностных изображений, на них можно видеть изменения в структуре короны, которые произошли за время того или иного события вследствие эрупции КВМ или по другим причинам. В частности, на таких изображениях темные образования соответствуют структурам, которые были яркими до события, но уменьшили свою яркость вследствие собственной эволюции, а также изменили локализацию или эруптировали в связи КВМ. Например, темное образование 1 над юго-восточным лимбом в событии 10 ноября (рис. 2е) обозначает собой то место, где на фоновом изображении двумя часами раньше наблюдался сравнительно узкий КВМ, не связанный с рассматриваемой активностью. С другой стороны, ряд квазирадиальных темных образований, к которым примыкают аналогичные яркие структуры, показывают, что в этих случаях, скорее всего, имело место заметное смещение корональных лучей под действием КВМ. Такие смещения видны, в частности, в двух событиях 3 ноября (рис. 2а,б) над северо-западным лимбом (структуры 2, 3), в событии 9 ноября (рис. 2д) над северо-западным и юго-западным лимбом (структуры 4, 5), в событии 10 ноября (рис. 2е) над юго-западным (структура 6) и, возможно, северо-западным лимбом (структура 7).

На соответствующих оригинальных фильмах LASCO (см. сайт, указанный в конце раздела 2) видно, что довольно часто имеет место не только смещение, но и колебания корональных лучей относительно своего положения до события. Как показывает анализ, в таких случаях вслед за первым отклонением коронального луча в сторону расширения КВМ, луч перемещается в противоположном

направлении, пересекает место своего исходного положения, затем снова меняет направление движения и постепенно возвращается в положение, близкое к первоначальному. Амплитуда (диапазон позиционных углов) таких колебаний сравним с угловой шириной коронального луча, а их характерное время измеряется десятками минут. Процесс колебаний начинается с малых гелиоцентрических расстояний и постепенно волнообразным образом охватывает большие высоты. Протяженность волны в вертикальном направлении порядка нескольких R_{\odot} . Характерно, что такие возмущения затрагивают корональные лучи, которые располагаются на значительном удалении от центральной оси КВМ. Это служит еще одним свидетельством того, что крупные КВМ приводят к сильным возмущениям в весьма обширной области короны.

Что касается корональных лучей, которые охватываются основной (наиболее яркой) частью КВМ, то они, вероятно, могут быть выброшены как часть КВМ. Это относится, например, к протяженным по позиционным углам, темным областям 8, 9, 10 в событиях 7 (рис. 2г), 9 (рис. 2д) и 10 ноября (рис. 2е), соответственно.

4. ДИММИНГИ И КОРОНАЛЬНЫЕ ВОЛНЫ

В этом разделе в качестве событий, типичных для обсуждаемого всплеска активности в ноябре 2004 г., рассмотрены эруптивные события с крупномасштабными диммингами и корональными волнами 6 и 7 ноября, которые вызвали самые сильные геомагнитные бури с индексом $D_{st} = -373$ и -289 нТл, соответственно, а также события 9 и 10 ноября с еще более крупномасштабными (глобальными) и гомологичными возмущениями на диске.

4.1. Событие 6 ноября 2004 г.

Это событие включало в себя продолжительную трехкомпонентную вспышку балла 2N/M9.3 в центральной зоне диска (координаты N09 E05) с максимумом в 00:34 UT и КВМ типа гало с наиболее яркими структурами над северным лимбом и отчетливым расширяющимся в обе стороны свечением вокруг остальной части затмевающего диска коронографа (рис. 2в). Судя по разностным изображениям EIT, соответствующие крупномасштабные возмущения в крайнем УФ-диапазоне в течение нескольких десятков минут охватили обширные участки в центральном и северном секторах диска. Как можно видеть на гелиограмме в канале 195 Å (рис. 3в), глубокие димминги сформировались в трансэкваториальных структурах между областями 696 и 695, а также в окрестностях обеих этих областей и некоторых

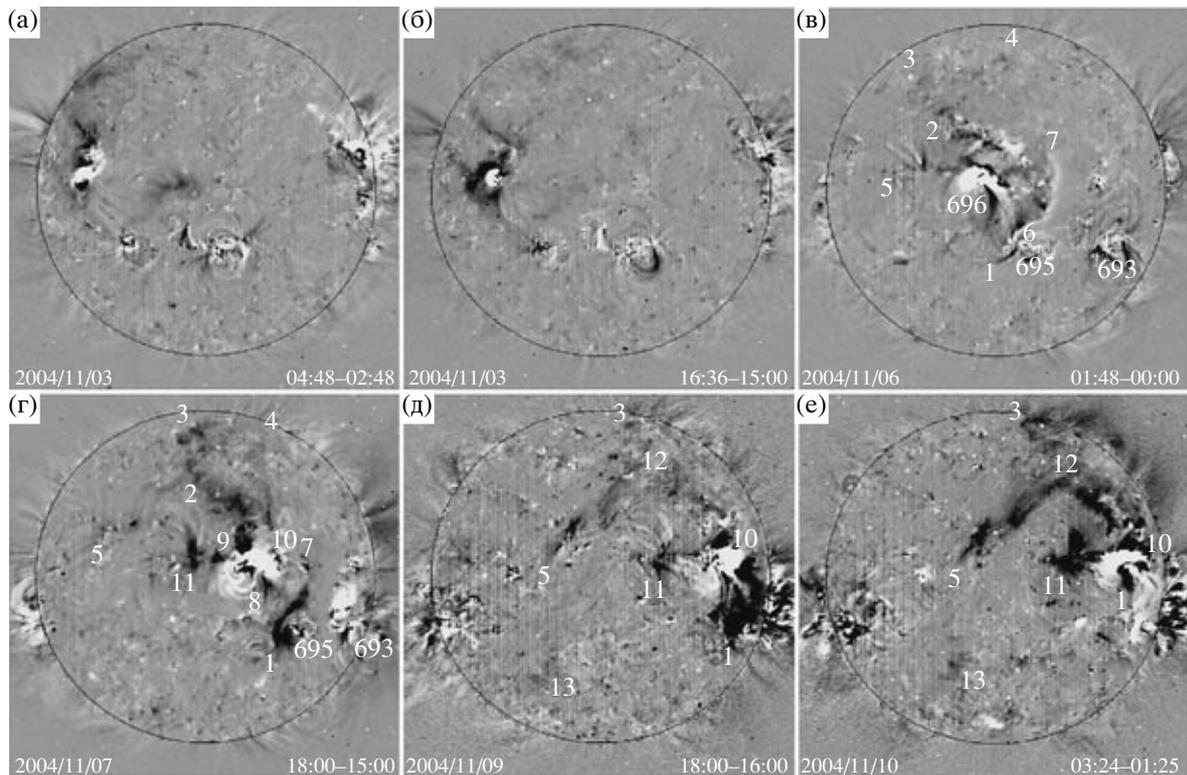


Рис. 3. Деротированные фиксированные разностные изображения SOHO/EIT в канале 195 Å, показывающие крупномасштабные возмущения, в частности, димминги (темные структуры) в 6 эруптивных событиях ноября 2004 г. Указано время как на рис. 2.

удаленных от них районах. При этом часть петель между областями 696 и 695 оказалась незатронутой диммингами или даже немного увеличила свою яркость после эрупции КВМ.

В южном направлении димминговые возмущения достигли точки 1 вблизи северо-западной границы корональной дыры КД1 (рис. 1). В северном направлении глубокий димминг сначала охватил район 2, а затем продолжился в виде диффузных потемнений в обширной высокоширотной зоне 2–3–4 между двумя корональными дырами КД3 и КД4. В восточном направлении узкий димминг прослеживался до точки 5.

Развитие диммингов к западу от области 696 сопровождалось, главным образом, в интервале 01:26–02:24 UT появлением и небольшим медленным смещением к западу узкой светящейся цепочки 6–7, локализованной вдоль восточной границы трансэкваториальной корональной дыры КД2. Заметные уменьшения яркости видны также над западным/северо-западным лимбом и в окрестности удаленной области 693, расположенной к юго-западу от корональной дыры КД2.

Картину диммингов во всех четырех разнотемпературных каналах EIT можно проследить, используя в качестве фоновых изображений бли-

жайшие к данному эруптивному событию гелиограммы, полученные 5 ноября в ~19 UT. При этом необходимо иметь в виду, что следующий набор гелиограмм относится к 6 ноября, ~01 UT, т.е. ко времени, когда развитие диммингов еще не завершилось, и разница в 6–19 мин между моментами наблюдений в разных каналах может существенно сказаться на наблюдаемой структуре и локализации диммингов. Соответствующие деротированные фиксированные разностные изображения представлены в верхнем ряду на рис. 4. Из этих изображений видно, что во всех трех корональных каналах 171 Å (рис. 4б), 195 Å (рис. 4в) и 284 Å (рис. 4г) к указанному на гелиограммах времени сформировались совпадающие по форме и локализации трансэкваториальные димминговые структуры между областями 696 и 695. Здесь в канале 284 Å виден также аналог описанной выше яркой цепочки 6–7, расположенной, как и на 195 Å (рис. 3в), вдоль восточной границы трансэкваториальной корональной дыры КД2 (рис. 1). Наиболее яркий южный фрагмент этой цепочки присутствует и в каналах 171, 195 Å. Полностью или частично совпадающими в корональных каналах диммингами, по-видимому, можно считать

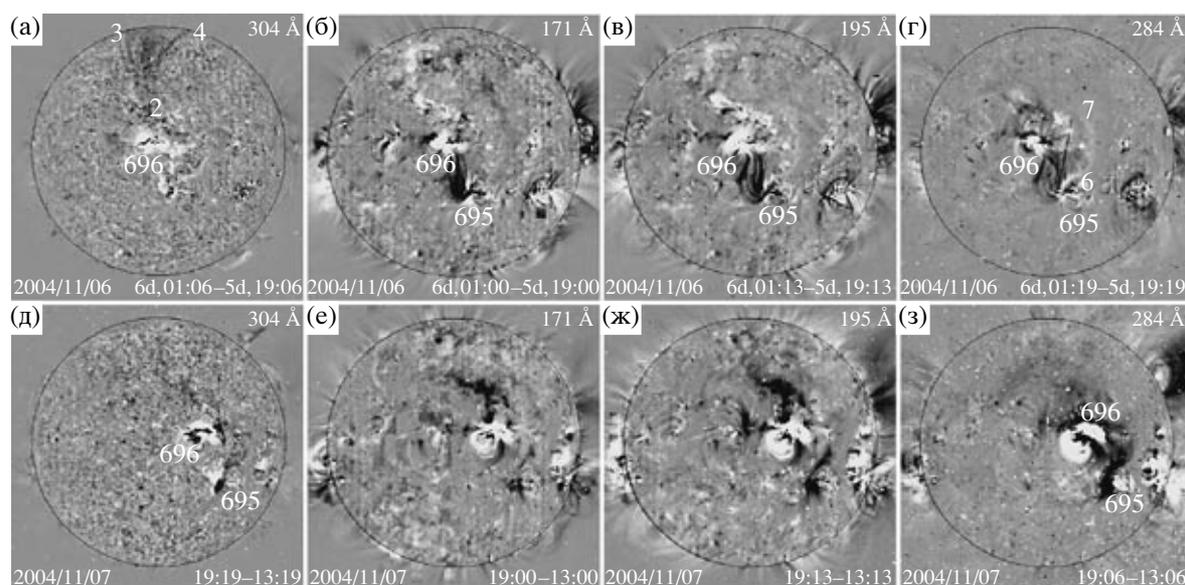


Рис. 4. Деротированные фиксированные разностные гелиограммы SOHO/EIT с 6-ч интервалами в четырех каналах 304, 171, 195 и 204 Å, иллюстрирующие димминги в каналах разной температуры для эруптивных событий 6 и 7 ноября 2004 г. Указано время как на рис. 2.

систему темных петель в южной/юго-восточной окрестности области 696 (особенно в каналах 171 и 195 Å) и димминги, простирающиеся к востоку от области 696.

Что касается крупномасштабных возмущений в северной половине диска, то здесь надо отметить, что присутствующая в каналах 171 и 195 Å (рис. 4б,д) яркая цепочка, простирающаяся от области 696 вдоль северо-западной границы корональной дыры КД4, вероятно, не связана с рассматриваемым эруптивным событием. Она отражает вариации излучения, произошедшие между временем взятых в данном случае базовых изображений (5 ноября, ~19 UT) и началом рассматриваемого события. В пользу такой интерпретации свидетельствует тот факт, что эта цепочка практически не проявляется на разностных гелиограммах в канале 195 Å (рис. 3в), полученных с 12-мин интервалом относительно базового изображения 6 ноября 00:00 UT.

Вместе с тем, на 6-ч разностных изображениях в трех корональных каналах (рис. 4б–г) проявляются, хотя и не столь отчетливо, фрагменты северной системы диффузных диммингов. Она охватывает обширный сектор между областью 696 и двумя корональными дырами КД3 и КД4. На этой стадии глубокие димминги в северной окрестности области 696 видны только в высокотемпературном канале 284 Å (рис. 4г). Существенно, что в канале переходного слоя 304 Å

(рис. 4а) практически во всем указанном выше северном секторе диска 2–3–4 вместо фрагментарных корональных диммингов наблюдается отчетливый крупномасштабный димминг, состоящий из нескольких расходящихся к полюсу узких темных структур. При этом южная трансэкваториальная система корональных диммингов между областями 696 и 695 почти не проявляется в канале переходного слоя 304 Å.

Как показывают представленные только на сайте разностные изображения между 5 ноября, 19 UT и следующим сеансом наблюдений в разнотемпературных каналах через еще один 6-часовой интервал, обе основные системы диммингов (трансэкваториальная южная и фрагментарная северная) в трех корональных каналах 171, 195 и 284 Å продолжали существовать, в основном, сохраняя свою структуру и локализацию, по крайней мере, до 6 ноября, 07 UT. В это же время в канале переходного слоя 304 Å северные димминги были выражены весьма слабо, но была видна часть южной трансэкваториальной димминговой структуры.

Последовательность 12-мин разностных гелиограмм в канале 195 Å позволяет получить некоторую, хотя и весьма ограниченную информацию о корональной волне. В данном событии соответствующее возмущение видно на 3 кадрах между 00:48 UT и 01:26 UT (рис. 5а) в виде диффузного уярчения, распространяющегося от центра эрупции к северному полярному району. Существенно, что распространение корональной волны происходило анизотропно, в пределах все того же сек-

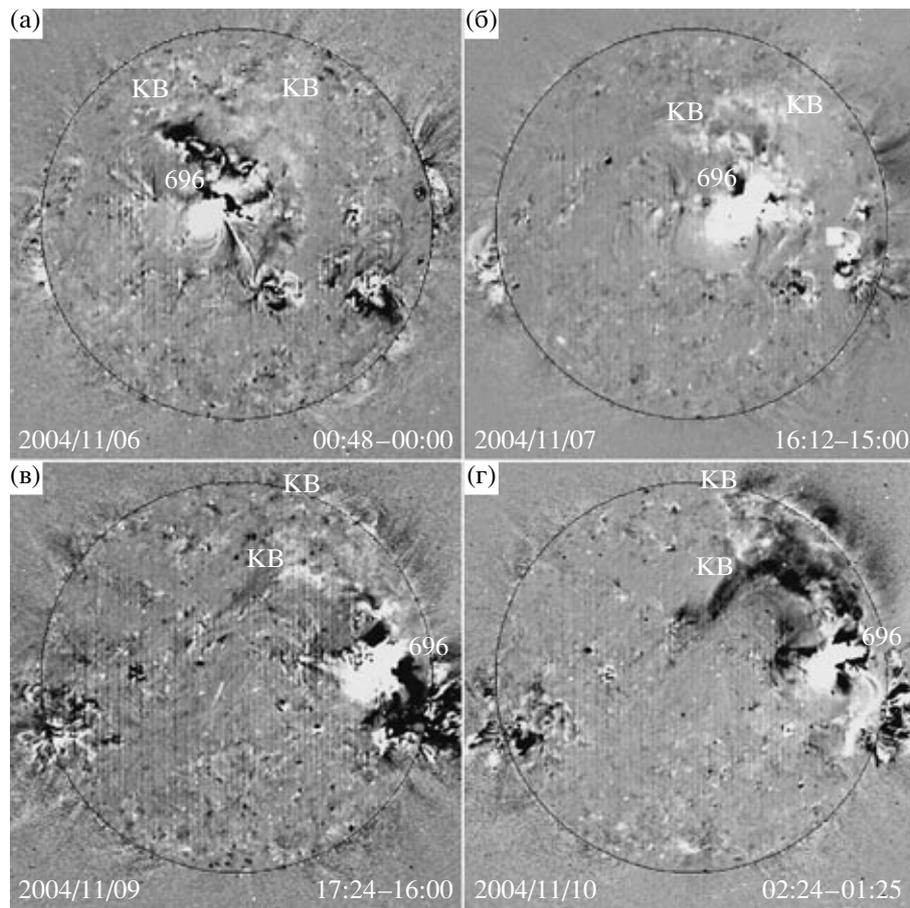


Рис. 5. Деротированные фиксированные разностные изображения SOHO/EIT в канале 195 \AA , показывающие корональные волны (КВ) и димминги в четырех эруптивных событиях ноября 2004 г. Указано время как на рис. 2.

тора между двумя корональными дырами КД3 и КД4, где вслед за ней развивалась северная система фрагментарных диммингов. Согласно грубым оценкам, скорость распространения, как обычно для УФ-корональных волн, составляла несколько сотен км/с.

4.2. Событие 7 ноября 2004 г.

Во многом аналогичная картина диммингов и корональной волны имела место 7 ноября после вспышки балла X2,0 (максимум в 16:06 UT; координаты N09 W17) и мощного КВМ типа полного гало с яркой расширяющейся петлеобразной структурой над северо-западным лимбом (рис. 2г). Деротированные разностные изображения в канале 195 \AA показывают, что это эруптивное событие сопровождалось развитием тех же двух основных крупномасштабных димминговых систем (южной трансэкваториальной и северной высокоширотной), которые наблюдались в предыдущем событии. К 18:00 UT эти димминги имели вид, представленный на рис. 3г. Здесь южная система

диммингов занимает не все пространство между областями 696 и 695, как было в событии 6 ноября, а состоит из двух компонент. Одна из них (8), имеет сравнительно небольшую площадь и локализуется к югу от области 696. Другая, более протяженная димминговая компонента (1–7) наблюдается на участке, где в событии 6 ноября имела место яркая транзиентная цепочка. Она вытянута вдоль восточной границы трансэкваториальной дыры КД2 (рис. 1), огибает область 695 с востока и достигает южной корональной дыры КД1. Эти две компоненты соединены между собой одним или двумя узкими димминговыми каналами. На начальной стадии события, в интервале 16:00–16:12 UT, в пространстве между двумя указанными димминговыми компонентами, имело место распространение яркого компактного выброса по искривленной S-образной траектории от эруптивного центра в области 696 к южной области 695.

Северная димминговая система в данном событии была развита гораздо сильнее, чем в событии 6 ноября. Из рис. 3г видно, что глубокими диммингами охвачено значительное пространство

северной половины диска. С запада оно ограничено корональной дырой КДЗ, с востока — корональной дырой КД4, а в меридиональном направлении простирается от северного полярного района до широты активной области 696 и южной границы восточной корональной дыры КД4. Эта димминговая система состоит из нескольких протяженных, связанных друг с другом и пересекающихся структур. Наиболее отчетливо выражен димминг 9—2—3, идущий от центра эрупции к корональной дыре КД4 и затем в район северного полюса. Еще один протяженный меридиональный димминг 10—4 простирается в тот же полярный район вдоль восточной границы корональной дыры КДЗ. В восточном направлении димминг сначала достигает темного ядра 11, а затем очерчивает петлеобразную структуру 11—5. Димминг 9—2—3, вероятно, тоже частично охватывает обращенные к северу крупномасштабные петли, идущие от эруптивного центра к южным окрестностям корональной дыры КД4. В связи с данным событием различные димминговые структуры наблюдались также над обширным участком западного лимба от окрестностей области 693 на юге до северного полярного района. В целом диапазон позиционных углов, в котором наблюдалась яркая петлеобразная структура КВМ (рис. 2г) соответствует сектору диска, в котором располагались крупномасштабные димминги.

Описанная выше картина диммингов обнаруживается и на деротированных разностных гелиограммах с 6-ч интервалом в четырех каналах ЕIT (рис. 4, нижний ряд). В трех корональных каналах 171 Å (рис. 4е), 195 Å (рис. 4ж) и 284 Å (рис. 4з) имеет место значительная аналогия формы и локализации основных диммингов, относящихся как к южной, так и к северной системам. При этом южные трансэкваториальные димминги между областями 696 и 695, а также димминговые структуры над северо-западным сектором лимба наиболее сильно развиты в высокотемпературных каналах 195 и 284 Å, а две ветви северной системы диммингов хорошо видны также в канале умеренной температуры 171 Å. В самом высокотемпературном канале 284 Å проявляется диффузная димминговая дуга, простирающаяся от эруптивного центра к западной границе северо-восточной корональной дыры КД4. В канале переходного слоя 304 Å (рис. 4д) видны отчетливые, хотя и сравнительно небольшие по площади, фрагменты южной и северной димминговых систем, соответствующие, вероятно, наиболее глубоким участкам корональных диммингов.

Что касается корональной волны, то в канале 195 Å она проявляется в интервале 16:12—16:36 UT. Как иллюстрирует рис. 5б, помимо диффузного уречения, она имеет резкий петлеобразный фронт.

Существенно, что, как и в предыдущем событии, данная корональная волна наблюдается в ограниченном угловом секторе, соответствующем северной димминговой системе, и распространяется все в том же пространстве между корональными дырами КДЗ и КД4. При этом корональная волна предшествует основным диммингам, хотя некоторые диффузные димминговые структуры появляются и перед фронтом корональной волны.

4.3. События 9 и 10 ноября 2004 г.

Эти два весьма сходные между собой значительные эруптивные события произошли с весьма небольшим интервалом порядка 9 ч. Соответствующие вспышки в области 696 имели место 9 ноября в ~17 UT (балл 2N/M8.9, координаты N07 W51) и 10 ноября в ~02 UT (3B/X2.5, N09 W49), а оба КВМ характеризовались как полное гало с наиболее ярко выраженной высокоскоростной эрупцией над обширным сектором западного лимба (рис. 2д,е).

Как показывают деротированные фиксированные разностные гелиограммы в канале 195 Å, в обоих событиях крупномасштабная активность имела такой же характер, как и в предшествующих событиях. В событии 9 ноября (рис. 3д) глубокий и обширный трансэкваториальный южный димминг охватил все пространство между областями 696 и 695, а также соответствующий сектор над западным лимбом. Основные северные димминги формировались вдоль крупномасштабных петлеобразных структур, простирающихся от эруптивного центра (область 696) к западной границе корональной дыры КД4 (рис. 1), которая в этот момент находилась вблизи центрального меридиана. Эти гигантские петлеобразные структуры хорошо видны на оригинальных гелиограммах за 9 и 10 ноября в каналах 195 и 284 Å, представленных на сайте. Среди них выделяется, в частности, крупномасштабная димминговая дуга 10—12—5. Эрупция затронула также петли, соединяющие удаленную димминговую ветвь 12—5 и димминг 10—11, примыкающий к эруптивному центру. Развитие димминговой ветви 12—5, по-видимому, продолжилось в южной половине диска вплоть до диммингового очага 13. Фрагментарными диммингами, как и в предшествующих событиях, был охвачен также северный высокоширотный сектор к западу от корональной дыры КД4 и соответствующий северо-западный сектор лимба.

В событии 10 ноября (рис. 3е) картина диммингов в канале 195 Å в значительной степени повторилась, а в северной системе даже весьма заметно усилилась, несмотря на малый временной

интервал между двумя рассматриваемыми событиями. В трансэкваториальном пространстве между областями 696 и 695 четкий димминг 1 виден лишь вблизи центра эрупции, а светящиеся трансэкваториальные петли и яркая южная подложка на фиксированных разностных изображениях отражают, очевидно, не столько реальное уярчение этих структур в связи с данным событием, сколько продолжающееся восстановление яркости после диммингового ослабления в ходе предыдущей эрупции. Зато все димминги, составляющие северную систему, стали гораздо более отчетливыми и глубокими, т.е. темными. Это относится, в частности, к гигантской димминговой дуге 10–12–5, к еще одной петлеобразной структуре 10–12–11, а также к высокоширотному диммингу 12–3 на границе корональной дыры КД4 и к диммингу над северо-западным сектором лимба. В этом событии снова виден и удаленный южный димминговый очаг 13, который, вероятно, связан относительно слабыми протяженными фрагментарными диммингами с северным дугообразным диммингом 10–12–5 и южным диммингом 1, примыкающим к центру эрупции.

Для обоих рассматриваемых событий разностные гелиограммы с 6-ч интервалом в четырех разнотемпературных каналах EIT, аналогичные тем, что приведены на рис. 4, представлены на сайте. Их анализ показывает, что и в событиях 9, 10 ноября имеет место почти полное совпадение основных диммингов в корональных каналах 171, 195, 284 Å и их частичные фрагментарные проявления в канале переходного слоя 304 Å.

Оба события сопровождалось корональными волнами в канале 195 Å (рис. 5в,г), которые обнаружили такие же характеристики, как и в предшествующих событиях. В обоих случаях заметная корональная волна была видна только к северу от эруптивного центра и распространялась к северному полярному сектору вдоль структур, которые оказывались также охваченными развивающимися диммингами. Рис. 5г иллюстрирует стадию, когда в событии 10 ноября фронт корональной волны достиг западной границы корональной дыры КД4 и, вероятно, по этой причине увеличил свою яркость.

5. ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенного анализа наиболее существенные характеристики крупномасштабной активности в серии эруптивных событий ноября 2004 г. можно резюмировать следующим образом.

1. Эрупция мощных КВМ и соответствующие вспышки сопровождалась крупномасштабными возмущениями, которые в крайнем УФ-диапазоне

имели глобальный характер и охватывали значительную часть солнечного диска, намного превышающую размеры основной активной области.

2. Димминги наблюдались в виде двух крупномасштабных систем: (1) южной трансэкваториальной, соединяющей центр эрупции в северной половине диска с удаленной активной областью, расположенной по другую сторону от гелиоэкватора; (2) северной, занимающей обширное пространство между центром эрупции, двумя корональными дырами и северным полярным районом. Как обычно [11, 26], относительное понижение яркости в основных диммингах (т.е. их глубина) составляла десятки процентов.

3. В каждом из событий как южные, так и северные основные димминги проявлялись практически одинаковым образом в трех корональных каналах 171, 195, 284 Å с разной температурой возбуждения линий. Наиболее глубокие фрагменты этих диммингов наблюдались также в канале переходного слоя 304 Å.

4. В рассматриваемых событиях корональные волны были анизотропными и распространялись от эруптивного центра только в северном направлении, в том же секторе диска между двумя корональными дырами, где формировалась северная система диммингов.

5. Обнаружен ряд дополнительных пекулярных свойств: формирование в одном из событий 6 ноября 2004 г. яркой транзиентной трансэкваториальной цепочки вдоль границы приэкваториальной корональной дыры; присутствие в том же событии в канале переходного слоя крупномасштабного северного приполярного димминга, который по глубине и занимаемой площади заметно превосходил соответствующие димминги в трех корональных каналах; отклонения/колебания удаленных от центра эрупции корональных лучей под действием КВМ.

Переходя к обсуждению этих наблюдательных результатов, отметим, прежде всего, что крупномасштабный характер возмущений свидетельствует о том, что в процесс эрупции крупных КВМ оказываются вовлеченными глобальные структуры солнечной магнитосферы, связывающие центр эрупции, в том числе, с весьма удаленными районами диска и областями короны. При этом диммингам подвергаются, в первую очередь, те из этих структур, которые на фоновых гелиограммах перед событиями имеют повышенную яркость [4, 21]. В данном случае южной системе диммингов соответствует ансамбль ярких трансэкваториальных петель, простирающихся от центра эрупции (область 696) к активной области 695. Вовлеченность такого рода трансэкваториальных петель в процесс эрупции КВМ наблюдалась

и в других событиях. Согласно, например, [27], неустойчивость именно таких петель может играть роль триггера, инициирующего эрупцию отдельных КВМ. В северной системе диммингов, особенно в событиях 9 и 10 ноября 2004 г., выделяются гигантские петли, соединяющие эруптивный центр и южные окрестности корональной дыры КД4. Как и в некоторых других событиях [21, 29], димминговые очаги в удаленных основаниях этих петель могут возникать почти сразу после начала развития диммингов в основаниях петель, соседствующих с центром эрупции. Такое развитие диммингов возможно, если на начальной стадии эруптивного события происходит подъем (вытягивание) верхней части петель, приводящее к квазисинхронному уменьшению меры эмиссии и яркости в обоих основаниях этих петель.

Наблюдаемое совпадение основных диммингов в трех корональных каналах, чувствительных к плазме с разной температурой, свидетельствует о том, что уменьшение яркости димминговых структур происходит не за счет вариаций температуры, а за счет уменьшения меры эмиссии [12, 14, 26]. В принципе, возможно, что такое уменьшение происходит при расширении закрытых магнитных структур на начальной стадии КВМ. Однако этот процесс может приводить лишь к сравнительно короткоживущим диммингам. Наиболее вероятной причиной возникновения долгоживущих диммингов с временем жизни, измеряемым часами, считается эвакуация вещества вдоль раскрывающихся (вытягивающихся) силовых линий в магнитных структурах, составляющих эруптирующий КВМ. Именно поэтому такого рода димминги называют транзитными корональными дырами. Прямым подтверждением такой интерпретации диммингов является истечение плазмы из них, обнаруженное в [30, 31] по доплеровскому сдвигу нескольких линий, регистрируемых на спектрометре SOHO/CDS. Не исключено также, что некоторые димминги образуются вследствие связанного с КВМ подавления нагрева плазмы и/или притока вещества в соответствующие структуры [32]. Проявления наиболее глубоких диммингов также и в низкотемпературном канале 304 \AA указывают на то, что эрупция КВМ и вызываемые ими процессы формирования диммингов затрагивают не только корону, но и плазму переходного слоя [12].

По результатам проведенных к настоящему времени исследований корональных волн в крайнем УФ-диапазоне, в том числе их сопоставления с диммингами, а также волнами Мортонa, наблюдаемыми в хромосфере в линии $H\alpha$, различают два типа корональных волн [21]: (а) волновая мода, которая распространяется независимо от диммингов и отождествляется с МГД-возмущением; (б) эруптивная мода, формирующиеся на фронтальной

границе расширяющихся диммингов в процессе последовательного раскрытия магнитных силовых линий по мере подъема КВМ. В анализируемой серии событий ноября 2004 г. корональные волны, скорее всего, следует отнести к эруптивному типу, поскольку они распространялись вдоль тех же северных структур между двумя корональными дырами КД3 и КД4, где вслед за ними развивалась северная система диммингов. Следует оговориться, что этот вывод нельзя считать окончательным, так как наблюдения EIT с 12-мин интервалом, при которых корональные волны фиксируются только на 2–3 кадрах, обычно оказываются недостаточными для их детального анализа. Заметим, что в сериях эруптивных событий ноября 2000 г. [18] и октября 2003 г. [3, 4] корональные волны имели, по-видимому, взрывной характер и распространялись в секторе диска, где димминги практически не возникали и отсутствовали активные области.

Совокупность описанных выше наблюдаемых свойств событий ноября 2004 г. дает основания характеризовать их как гомологические. Такой вывод следует из подобия основных крупномасштабных возмущений в повторяющихся событиях данной серии. В частности, начиная с событий 3 ноября 2004 г. (рис. 3а,б), практически во всех случаях имели место аналогия формы и локализации как южной, так и северной димминговых систем, сходный характер корональных волн, распространявшихся только в северном секторе диска, и одинаковый вид КВМ типа гало с яркими петлеобразными структурами над наиболее обширной северной системой диммингов. Крупномасштабная гомология, по-видимому, является типичной для серийных эруптивных событий. Она была, в частности, одной из основных характеристик событий ноября 2000 г. [18] и октября–ноября 2003 г. [3, 4]. Наблюдаемая гомология означает, что за время между двумя последовательными событиями создаются условия для новой эрупции одних и тех же корональных структур глобальной солнечной магнитосферы. На примере событий 9 и 10 ноября 2004 г. видно, что этот временной интервал может быть весьма незначительным — порядка 9 ч. Применительно к диммингам и корональным волнам гомология указывает на то, что за это время крупномасштабные структуры могут частично или полностью восстановить свою яркость, а тип корональных волн и их анизотропное распространение в ограниченном угловом секторе обеспечивается аналогичным характером энерговыделения в процессе КВМ и сохраняющимися свойствами глобальной солнечной магнитосферы. Конкретные механизмы, определяющие гомологию крупномасштабных возмущений в повторяющихся эруптивных событиях, пока остаются не вполне ясными и нуждаются в дальнейшем изучении.

До сих пор образование узких ярких транзитных цепочек обнаруживалось, в основном, при взаимодействии крупномасштабных эруптивных возмущений с полярными корональными дырами [14]. В событии 6 ноября 2004 г. такая цепочка примерно в течение часа наблюдалась на границе между развивающейся южной системой диммингов и трансэкваториальной корональной дырой КД2. Очевидно, что эта цепочка формировалась на стадии интенсивного взаимодействия двух разных магнитных структур: открытых силовых линий долгоживущей корональной дыры и постепенно раскрывающегося магнитного поля развивающегося димминга. Результатом такого взаимодействия может быть, в частности, сжатие плазмы и магнитное пересоединение на границе взаимодействующих магнитных потоков, сопровождаемые интенсивным энерговыделением. По всей вероятности, такой же процесс имеет место при формировании корональных волн эруптивного типа.

Огромный северный димминг зарегистрирован в событии 6 ноября 2004 г. в канале переходного слоя 304 Å только на одном имеющемся кадре спустя 30–40 мин после оценочного времени эрупции. Это не позволяет судить о его динамике. Аналогичный димминг, наблюдавшийся в этом же канале телескопом КОРОНАС-Ф/СПИРИТ в событии 18 ноября 2003 г. [4], имел транзитный характер, распространялся от центра эрупции со скоростью около 200 км/с и, по всей вероятности, был обусловлен поглощением излучения в холодной плазме эруптивированного волокна. Возможно, димминг 6 ноября 2004 г. имеет аналогичную природу и также связан с поглощением излучения в хвостовой части отсоединившегося КВМ.

Отклонение и даже “сдувание” корональных лучей под действием КВМ были обнаружены еще по данным коронографа/поляриметра на спутниковой обсерватории Solar Maximum Mission [28]. На примере данной серии событий более качественные наблюдения на коронографах SOHO/LASCO с высокой чувствительностью и перекрытием гораздо большего диапазона гелиоцентрических расстояний показывают, что вслед за отклонением могут иметь место и колебания корональных лучей, в том числе весьма удаленных по позиционным углам от центральной оси КВМ в картинной плоскости. Это малоизученное явление, как и некоторые другие свойства крупномасштабной активности в серии событий ноября 2004 г., должны стать предметом дополнительных специальных исследований.

Автор благодарен коллективам SOHO/EIT и LASCO за данные, использованные при анализе (SOHO — проект международного сотрудничества

ESA и NASA). Автор признателен В.В. Гречневу (ИСЗФ, Иркутск) за IDL-программы формирования разностных изображений и за полезные обсуждения содержания статьи. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 03-02-16049) и Министерства образования и науки РФ (грант НШ 1445.2003.2), а также программ фундаментальных исследований РАН “Нестационарные явления в астрономии” и “Солнечная активность и физические процессы в системе Солнце—Земля”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. И. С. Веселовский, М. И. Панасюк, С. И. Авдюшин и др., *Космич. исслед.* **35**, 453 (2004).
2. Ю. И. Ермолаев, Л. М. Зеленый, Г. Н. Застенкер и др., *Геомагн. и аэрон.* **45**, 20 (2005).
3. И. М. Черток, В. В. Гречнев, *Астрон. журн.* **82**, 180 (2005).
4. V. V. Grechnev, I. M. Chertok, V. A. Slemzin, *et al.*, *J. Geophys. Res.* **110**, A09S07, doi:10.1029/2004JA010931 (2005).
5. J.-P. Delaboudinière, G. E. Artzner, J. Brunaud, *et al.*, *Solar Phys.* **162**, 291 (1995).
6. I. A. Zhitnik, O. I. Bougaenko, J.-P. Delaboudinière, *et al.*, *Proc. of the 10th European Solar Physics Meeting, ESA SP-506*, p. 915 (2002).
7. D. F. Webb, *J. Atmosph. and Solar-Terr. Phys.* **62**, 1415 (2000).
8. A. S. Sterling, *J. Atmosph. and Solar-Terr. Phys.* **62**, 1427 (2000).
9. N. Gopalswamy and B. J. Thompson, *J. Atmosph. and Solar-Terr. Phys.* **62**, 1458 (2000).
10. H. S. Hudson and E. W. Cliver, *J. Geophys. Res.* **106**, 25199 (2001).
11. И. М. Черток, В. В. Гречнев, *Астрон. журн.* **80**, 162 (2003).
12. И. М. Черток, В. В. Гречнев, *Астрон. журн.* **80**, 1013 (2003).
13. N. Gopalswamy, *The Sun and the Heliosphere as an Integrated System*, eds G. Poletto and S. Suess, *ASSL Ser.* (2004), p. 201.
14. B. J. Thompson, S. P. Plunkett, J. B. Gurman, *et al.*, *Geophys. Res. Lett.* **25**, 2465 (1998).
15. A. Klassen, H. Aurass, G. Mann, *et al.*, *Astron. and Astrophys.* **141**, 357 (2000).
16. A. Warmuth, B. Vršnak, J. Magdalenic, *et al.*, *Astron. and Astrophys.* **418**, 1117 (2004).
17. D. A. Biesecker, D. C. Myers, B. J. Thompson, *et al.*, *Astrophys. J.* **569**, 1009 (2002).
18. I. M. Chertok, V. V. Grechnev, H. S. Hudson, and N. V. Nitta, *J. Geophys. Res.* **109**, A02112, doi:10.1029/2003JA010182 (2004).
19. G. E. Moreton and H. E. Ramsey, *Publs Astron. Soc. Pacif.* **72**, 357 (1960).
20. C. Delannée, *Astrophys. J.* **545**, 512 (2001).
21. A. N. Zhukov and F. Auchère, *Astron. and Astrophys.* **427**, 705 (2004).

22. P. F. Chen, C. Fang, and K. Shibata, *Astrophys. J.* **622**, 1202 (2005).
23. G. E. Brueckner, R. A. Howard, M. J. Koomeen, *et al.*, *Solar Phys.* **162**, 357 (1995).
24. Ю. И. Ермолаев, Л. М. Зеленый, Г. Н. Застенкер и др., *Геоманг. и аэрон.* (2005, в печати).
25. I. M. Chertok and V. V. Grechnev, *Solar Phys.* **229**, 95 (2005).
26. D. M. Zarro, A. C. Sterling, B. J. Thompson, *et al.*, *Astrophys. J.* **520**, L139 (1999).
27. J. I. Khan and H. S. Hudson, *Geophys. Res. Lett.* **27**, 1083 (2000).
28. A. J. Hundhausen, *The Many Faces of the Sun*, eds K. Strong *et al.* (New York: Springer-Verlag, 1999), p. 143.
29. T. Wang, Y. Yan, J. Wang, *et al.*, *Astrophys. J.* **572**, 580 (2002).
30. L. K. Harra and A. C. Sterling, *Astrophys. J.* **561**, L215 (2001).
31. R. A. Harrison, P. Bryans, G. M. Simnett, and M. Lyons, *Astron. and Astrophys.* **400**, 1071 (2003).
32. A. M. Uralov, V. V. Grechnev, and H. S. Hudson, *J. Geophys. Res.* **110**, A05104, doi:10.1029/2004JA010951 (2005).

Large-Scale Activity in Major Solar Eruptive Events of November 2004 According to SOHO Data

I. M. Chertok

Data obtained with the EIT UV telescope and LASCO coronagraph of the SOHO satellite are used to analyze large-scale solar disturbances associated with a series of major flares and coronal mass ejections that occurred in the late decline phase of cycle 23, on November 3–10, 2004, and gave rise to strong geomagnetic storms. Derotated fixed-difference heliograms taken in the 195-Å coronal channel at 12-min intervals and in the various-temperature 171-, 195-, 284-, and 304-Å channels at 6-h intervals indicate that these disturbances were global and homologous; i.e., they had similar characteristics and affected the same structures. Almost all of the nine events of this series included two recurrent systems of large-scale dimmings (regions of reduced intensity with lifetimes of 10–15 h): (a) transequatorial dimmings connecting a northern near-equatorial eruption center with a southern active region and (b) northern dimmings covering a large sector between two coronal holes. In this northern sector, coronal waves were observed ahead of the expanding dimmings; i.e., brightenings propagated from the eruption center at speeds of several hundred km/s. The brightest, central part of the halo-type coronal mass ejection in each event corresponded to the northern dimming system. The properties of the dimmings and coronal waves and the relationship between them are discussed on the basis of the results obtained. We find that the eruption of large coronal mass ejections involves structures of the global solar magnetosphere with spatial scales far exceeding the sizes of active regions and normal activity complexes.