

УДК 523.983-46

РОЛЬ ВЫБРОСОВ ПЛАЗМЫ В РАЗВИТИИ МОЩНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК РАЗЛИЧНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ

© 2006 г. А. Н. Шаховская¹, М. А. Лившиц², И. М. Черток²

¹Научно-исследовательский институт “Крымская астрофизическая обсерватория”,
Научный, Крым, Украина

²Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова,
Троицк, Россия

Поступила в редакцию 15.05.2006 г.; принята в печать 07.07.2006 г.

Современные наблюдения показывают, что достаточно мощный выброс плазмы сопровождается формированием системы корональных петель и появлением двух лент, светящихся близ их оснований. Однако в одних случаях двухленточная вспышка длится, например, в мягком рентгеновском диапазоне много часов, в других — затухает в течение десятков минут. На примере четырех мощных вспышек 15–18 июля 2002 г. исследуется вопрос о причинах, влияющих на длительность вспышек. На основе разнообразных наземных и спутниковых наблюдений показано, что кратковременные быстрые события включали в себя коллимированные (узкие) выбросы плазмы в северном направлении и последующее формирование компактных петель в головной части активной области. В одном из событий, вслед за мощным выбросом в широком телесном угле в восточном направлении, в хвостовой части области сформировалась протяженная арочная система, определившая длительный характер вспышки. Есть основания полагать, что в тех событиях, где присутствуют коллимированные (узкие) выбросы и соответствующие узкие детали корональных выбросов массы (КВМ), система корональных петель образуется, но постэруптивное энерговыделение не возникает или выражено очень слабо, энергия из этой области не поступает вниз, и плазма в корональных петлях свободно высвечивается. В отличие от этих быстрых вспышек, широкий выброс и крупномасштабный яркий КВМ сопровождаются формированием и длительным существованием протяженной арочной системы. Таким образом, мощные нестационарные процессы на Солнце включают в себя крупномасштабный КВМ и собственно вспышку, в которых реализация процесса пересоединения вместе с эволюцией вынесенной наружу плазмы определяют характер конкретного явления.

PACS numbers : 96.60.qe, 96.60.pf, 96.60.ph

1. ВВЕДЕНИЕ

Как известно, солнечные вспышки можно разделить на два класса, существенно различающиеся по характеру временного профиля излучения, пространственной структуре и другим характеристикам: быстрые (компактные) и длительные (long-duration events — LDE) (см., например, обзор [1] и приведенную там библиографию). В частности, анализ многолетних наблюдений мягкого рентгеновского излучения Солнца на спутниках серии GOES показывает, что эти два класса событий видны даже среди мощных вспышек с рентгеновским баллом более M5. В одних случаях рентгеновский всплеск имеет форму узкого спайка и длится весьма небольшое время (от нескольких минут до получаса), а в других — после достаточно резкого достижения максимума медленно затухает в течение многих часов (рис. 1а–1в).

Мощные явления раньше назывались вспышками со сложной пространственно-временной структурой. Современные наблюдательные данные позволяют различать отдельные эпизоды таких вспышек, каждый из которых состоит из выброса (эрупции) и образования системы корональных петель, заполненных горячей плазмой. В некоторых случаях, после образования плотных вспышечных петель, происходит их свободное высвечивание. Время высвечивания варьируется от нескольких до двух–трех десятков минут. По этой причине такие события, даже большой мощности, являются весьма непродолжительными. Они часто отождествляются с компактными вспышками [1, 2], $H\alpha$ -ленты которых не выходят за пределы активных областей сравнительно небольших размеров (менее 5'). Длительные же вспышки происходят, когда мощные выбросы плазмы сопровождаются формированием петель, которые или долго существуют вследствие

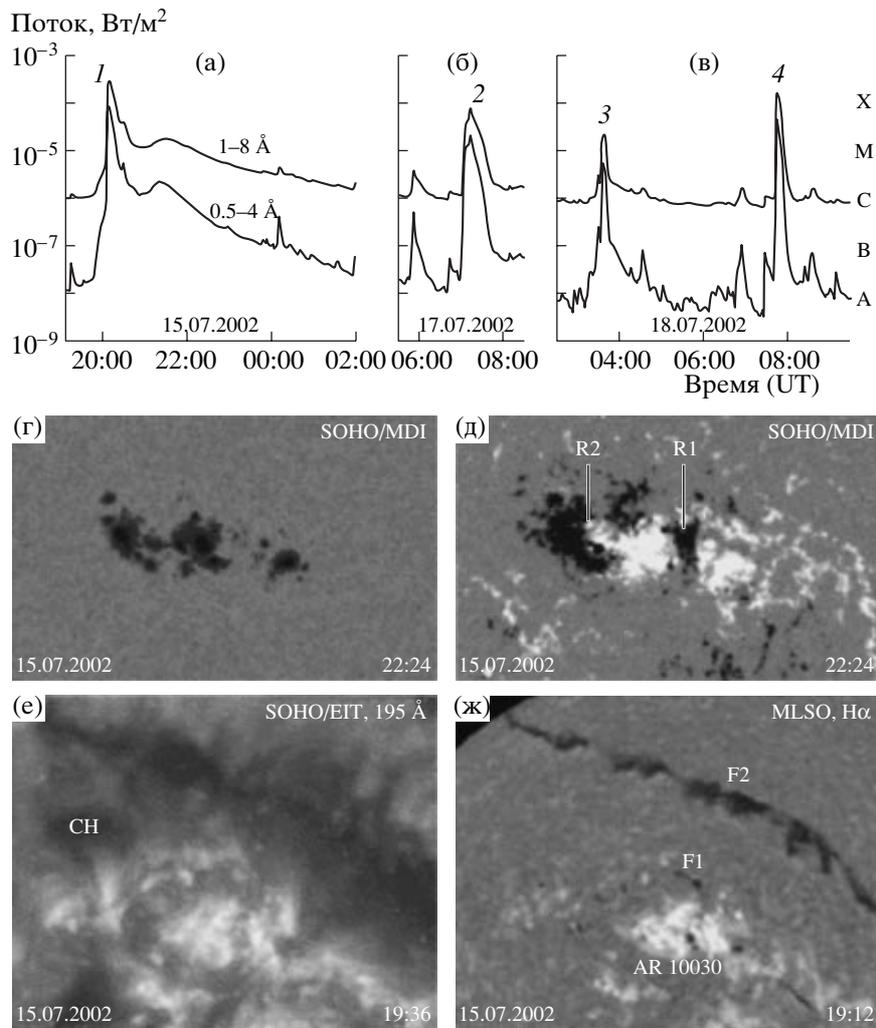


Рис. 1. (а–в) — Временные профили вспышек 15–18 июля 2002 г. в мягком рентгеновском диапазоне по данным GOES-8 (таблица). (г, д) — Группа пятен и магнитограмма активной области 10030 по данным SOHO/MDI (на магнитограмме белый и черный цвета соответствуют полю северной и южной полярности). (е, ж) — Гелиограммы части северной половины диска в канале 195 Å (SOHO/EIT) и в линии H α (Мауна Лоа), иллюстрирующие соответственно системы ярких крупномасштабных корональных петель, простирающиеся от головной части области 10030 до окрестностей восточной корональной дыры CN, волокно F1, исходящее из района R1, и протяженное волокно F2, расположенное в высокоширотном секторе северной половины диска. Расстояние между центрами больших крайних пятен близко к 100''.

дополнительного нагрева плазмы близ вершин, или происходит последовательное образование все новых и новых петель. На заключительной стадии таких событий наблюдается подъем всей системы постэруптивных петель — образуется гигантская арочная система.

Хотя многие свойства быстрых и длительных событий достаточно хорошо известны, конкретные причины, по которым реализуется тот или иной сценарий вспышки, остаются невыясненными. Из общих соображений ясно, что большую роль здесь играют особенности магнитной конфигурации той активной области, где развивается явление. Кроме того, важны характеристики выброса плазмы, который часто приводит к раскрытию замкнутых

петель в процессе коронального выброса массы (КВМ или Coronal Mass Ejection — CME), последующей релаксации магнитных полей к новому квазиравновесному состоянию (развитие идей Коппа и Пноймана [3]; см. [4] и цитируемую там литературу) и дополнительному поступлению энергии в верхнюю часть образовавшихся постэруптивных петель.

В данной работе роль выбросов плазмы в последующем развитии вспышки, в частности, в обеспечении длительного свечения постэруптивных петель, анализируется на примере мощных вспышек 15–18 июля 2002 г. Эта серия вспышек включала в себя 4 события классов от M3 до X4.8, произошедшие в одной и той же активной области.

Одно из этих событий 18 июля предварительно обсуждалось в [5]. В нем на коронографах КрАО наблюдался интенсивный выброс, после которого, казалось бы, должна развиваться мощная постэруптивная фаза. Однако в этой короткой вспышке этого не произошло. В [5] предполагалось, что в этом случае появление темного выброса в области около пятна резко изменило ход вспышечного процесса и привело к быстрому его затуханию. В настоящей статье мы анализируем с этой точки зрения четыре наиболее мощные явления указанной серии.

2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И ОБЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АКТИВНОСТИ

Отправной точкой этой работы явился анализ оригинальных наблюдений на малом коронографе КрАО, описанном [6–8]. Он позволяет получать достаточно частые изображения диска Солнца или отдельной активной области в центре линии $H\alpha$ или в крыльях при удалении примерно на 1 \AA с временным разрешением от 1 с. Это дает возможность регистрировать интересующие нас выбросы. В отличие от предшествующих наблюдений, здесь регистрация изображения проводилась цифровой камерой. Кроме того, использовались некоторые материалы большого коронографа КрАО.

Привлекались дополнительные данные о хромосферной активности, полученные в линии $H\alpha$ на наземных телескопах обсерваторий Биг Бэр и Мауна Лоа (сайты <ftp://ftp.bbso.njit.edu/pub/archive/> и http://mlso.hao.ucar.edu/cgi-bin/mlso_data.cgi?2002&ACOS), а также в полосе 1600 \AA на спутнике TRACE [9]. Сопровождающие явления в короне изучались по наблюдениям на том же спутнике TRACE в каналах 171 и 195 \AA (<http://trace.lmsal.com/>), а также на телескопе крайнего УФ-диапазона SOHO/EIT [10] в канале 195 \AA (<http://umbra.nascom.nasa.gov/eit/eit-catalog.html>). При этом, наряду с оригинальными изображениями Солнца, использовались так называемые фиксированные разностные изображения [11, 12]. Последние получаются путем компенсации солнечного вращения и вычитания одного фонового изображения перед событием из всех последующих гелиограмм. Представлены также фиксированные разностные изображения КВМ, полученные на основе наблюдений на спутниковом коронографе белого света SOHO/LASCO [13] (http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/; каталог КВМ [14]). Характеристики вспышек в мягком рентгеновском диапазоне анализировались по данным спутников GOES-8 [15] (<http://spidr.ngdc.noaa.gov/spidr/query.do?group=GOES&>). Используются также магнитограммы, полученные на

SOHO/MDI [16] (<http://soi.stanford.edu/data/>). Ниже в статье приводятся только самые необходимые иллюстрации. Дополнительные данные в виде разного рода изображений, гелиограмм и компьютерных фильмов представлены на сайте <http://www.crao.crimea.ua/shakhovskaya/july2002.html>.

В таблице приведены общие характеристики четырех мощных вспышек, произошедших в активной области AR 10030 (кэррингтоновские координаты $N = 19$, $L = 012$) в период 15–18 июля 2002 г. (см. сайт Solar-Geophysical Data <http://sgd.ngdc.noaa.gov/sgd/jsp/solarfront.jsp>). Из данных таблицы и рис. 1а–1в видно, что в мягком рентгеновском диапазоне три вспышки 17 и 18 июля, несмотря на достаточно высокий балл (от M2.2 до X1.8), имели вид кратковременных импульсов с длительностью на уровне 1/5 от максимума порядка 25, 12 и 11 мин, соответственно, т.е. были быстрыми. Только в самой мощной вспышке 15 июля (балл X3.0) вслед за столь же кратковременным (17 мин) импульсом наблюдалась дополнительная компонента (балл M3.8) с медленным спадом излучения, характерным для LDE-событий, и длительностью 2–3 ч.

Для дальнейшего рассмотрения важно, что фотосферное магнитное поле в AR 10030 (рис. 1г, 1д) характеризовалось сложной $\beta\gamma\delta$ -конфигурацией квадрупольного типа, а сама активная область имела значительную протяженность в гелиодолготном направлении. В головной (западной) части области между двумя крупными пятнами северной полярности располагался район южной полярности (R1), формируя тем самым две нейтральные линии сравнительно небольшой протяженности. Более протяженная нейтральная линия (R2) располагалась в восточной части области, между центральным пятном северной полярности и хвостовым пятном южной полярности. Во время прохождения области по диску в окрестностях всех трех нейтральных линий наблюдалось большое количество динамично развивающихся мелких пятен и пор, формировавших новые всплывающие магнитные потоки. Как показывает гелиограмма в линии 195 \AA (рис. 1е), оба западных пятна северной полярности были соединены светящимися корональными петлями с хвостовым пятном южной полярности. Кроме того, ряд протяженных (высоких) УФ-петель простирался из самой западной части области в район восточного хвостового пятна и близлежащей корональной дыры. Система петель между головными и хвостовым пятнами, вероятно, располагалась над $H\alpha$ -волоком F1, исходящим из AR 10030 в северо-восточном направлении (рис. 1ж). Следует добавить, что в линии $H\alpha$ и в УФ-канале 195 \AA было видно весьма протяженное,

Данные о рассматриваемых событиях

№ п/п	Дата	Вспышка					Выброс				КВМ		
		t_0	t_m	d , мин	Балл	Координаты	t_e	Тип	Направление	V_j , км/с	t_c	Тип	V_c , км/с
1	15.7.2002	20:02	20:08	17	3В/Х3.0	N19 W01	20:03:27	NL	N	370			
							20:04:23	NL	N	700	20:30	PH+S	1150
		<21:03	21:32	>180	M3.8	—	20:24	WF	E	310	21:30	PH+S	1300
2	17.7.2002	07:00	07:13	25	1В/М8.5	N21 W17	07:17	NJ	N	190	07:31	PH+S	715
3	18.7.2002	03:22	03:37	12	SB/М2.2	N20 W27	03:38	LM	N-NE	—	нет КВМ		
4	18.7.2002	07:38	07:44	11	2В/Х1.8	N19 W30	07:42	NL	N	430	08:06	PH+S	1100

Примечание. Величины t_0 , t_m и d — время начала, время максимума и длительность (на уровне 1/5 от максимума) всплеска в мягком рентгеновском диапазоне по данным SGD; t_e — время основной фазы выброса; тип выброса: NL — узкая петля, WF — широкий фронт, NJ — узкий джет, LM — движение плазмы внутри (вдоль) петли; направление выброса: N — на север, E — на восток, N-NE — на север, а затем на северо-восток; V_j — скорость выброса; t_c — время первого наблюдения КВМ на коронографе LASCO/C2; тип КВМ PH+S — частичное гало с яркими внутренними структурами; V_c — скорость КВМ в картинной плоскости. За начало выброса для события 3 принят момент второго пика микроволнового всплеска. Для всех моментов времени приведено время UT.

крупное волокно F2, которое располагалось севернее AR 10030 и простиралось от приэкваториального района западного лимба до северо-восточного лимба.

3. БЫСТРАЯ ВСПЫШКА 18 ИЮЛЯ 2002 г.

Изучение серии быстрых вспышек начнем со второго, более мощного события 18 июля (№ 4 в таблице). По наблюдениям TRACE в диапазоне 1600 Å вспышка началась в 07 : 41¹⁾, и в это же время по данным GOES наблюдается резкое возрастание рентгеновского потока после небольшого предвестника в 07 : 20. Максимум потока в каналах GOES был достигнут в 07 : 44. Оптические наблюдения на коронографе КГ-1 начались в 07 : 42. В линии H α с 07 : 42 до 07 : 44 вспышка развивалась обычным образом — поднимались две яркие вспышечные петли, рос рентгеновский поток.

В диапазоне 1600 Å после 07 : 42 стал заметен мощный выброс 1 (рис. 2а–2в). Выбрасываемое вещество имело вид поднимающейся светлой петли, основания которой располагались в северных частях двух вспышечных лент. Истечение вещества продолжалось практически все время развития этой быстрой вспышки. Скорость фронта выброса мало менялась; ее максимальное значение достигло 430 км/с по наблюдениям в диапазоне 1600 Å.

В линии H α (рис. 2г, 2д) после 07 : 45 этот выброс стал наблюдаться в виде узкого темно-го образования 2. Практически в это же время

рентгеновский поток вспышки начал резко падать, также как и яркость лент в H α и 1600 Å. До 07 : 51 выброс по наблюдениям в H α вытягивается к северу, оставаясь длинным и узким, а после 07 : 51 это вытягивание прекращается, и он начинает веером разделяться сначала на две, а потом и на четыре части, а также становится более темным в северном конце. После 08 : 05 выброс начинает медленно бледнеть, не меняя своей формы. В конце наблюдений на КГ-1 в 09 : 05 выброс практически не различается. По наблюдениям SOHO/EIT в канале 195 Å выброс был виден на изображениях в 08 : 00 и 08 : 12. Здесь он также был темным и хорошо повторял структуру высоких корональных арок. Дуги выброса веерно расходятся от AR 10030 к северу и доходят до канала полярного волокна F2.

В 08 : 06 на КГ-1 были получены фильтрограммы в крыльях H α со сдвигом 0.5 Å в синее и красное крыло. Выброс хорошо был виден в крыльях, причем в красном крыле его площадь значительно превосходила площадь в синем крыле. В красном крыле лучше, чем в центре линии видна линейчатая структура выброса — его распад на 3–4 полоски, вытянутые вдоль меридиана. Мы построили разностное изображение путем наложения фильтрограмм в синем и красном крыле, причем красное крыло бралось в негативе, а синее — в позитиве. На рис. 2е оно показано для момента 08 : 06, где темные места соответствуют подъему, а светлые опусканию материи. Отсюда следует, что видимый в H α темный “сердж” в основном состоит из поднимающейся материи.

¹⁾Для всех моментов времени в данной статье указано время UT.

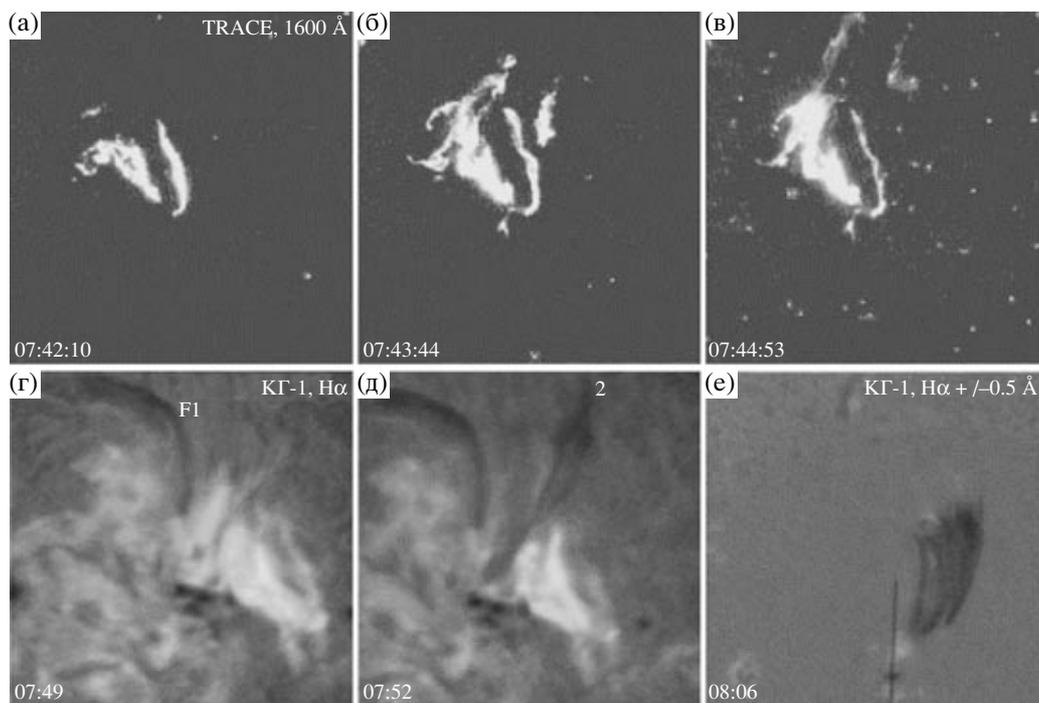


Рис. 2. Развитие коллимированного выброса в быстром событии 18 июля 2002 г. (№ 4) по данным TRACE в диапазоне 1600 \AA (а–в) и в линии $H\alpha$ (г, д) по данным коронографа КГ-1. На диаграмме (е) приведена разностная доплерограмма выброса в синем (темные области) и красном (светлые области) крыльях линии $H\alpha$; указано также положение щели большого коронографа КрАО.

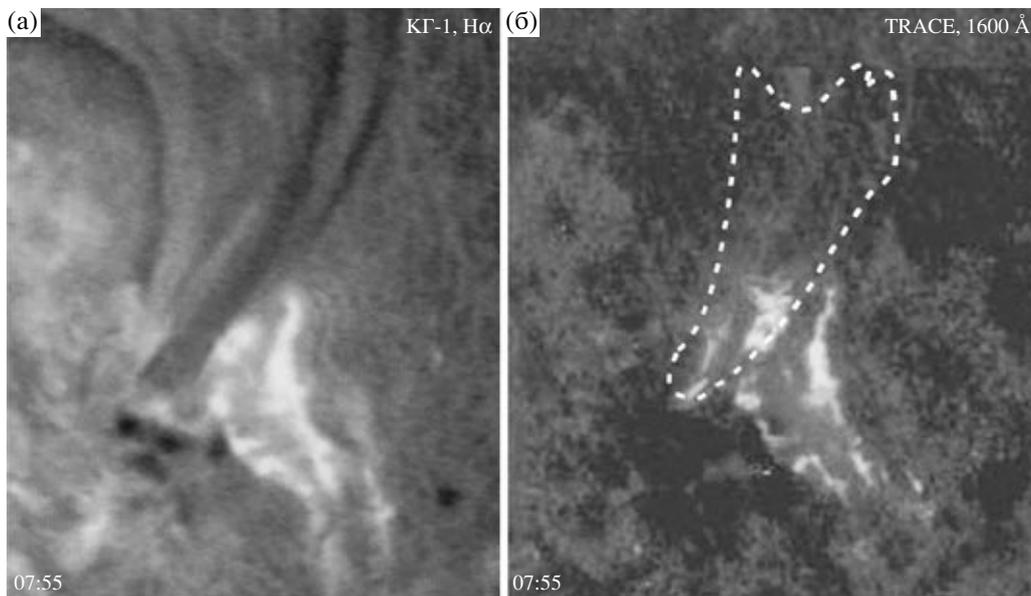


Рис. 3. Снимки двухленточной вспышки 18 июля 2002 г. (№ 4) в линии $H\alpha$ (а) и в канале 1600 \AA (б) с наложением контура $H\alpha$ -выброса в центре линии (штриховая кривая).

Наблюдаемый низкотемпературный выброс был достаточно мощным. Так, даже на заключительном этапе развития вспышки через этот выброс в

центре $H\alpha$ не было видно низколежащих частей вспышки. Это время 07 : 55 соответствует моменту, когда выброс в $H\alpha$ потемнел, а в 1600 \AA стал

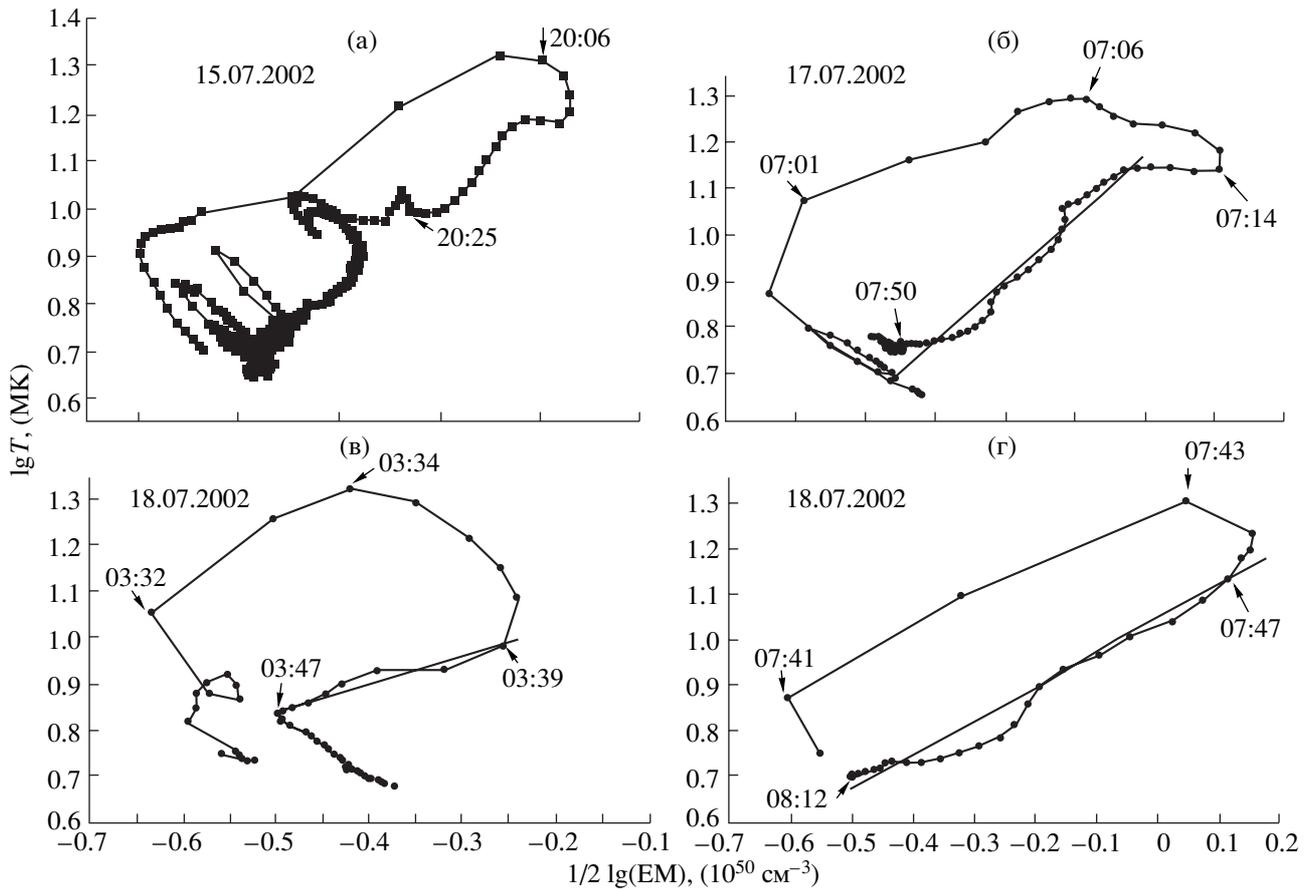


Рис. 4. Гистерезисные диаграммы “ $\lg T - 1/2 \lg EM$ ”, построенные по минутным данным рентгеновских каналов спутника GOES-8 для события 15 июля 2002 г. (№ 1) с быстрой и длительной компонентами (а), а также для быстрых вспышек (№ 2—№ 4) 17 и 18 июля 2002 г. (б–г). Указано время некоторых характерных моментов развития явлений.

прозрачным. Этот наглядный пример поглощения иллюстрируется на рис. 3, где в диапазоне 1600 Å через низкотемпературный выброс можно видеть всю “хромосферную” вспышку, а в свете центра линии H α часть вспышки оказалась закрыта. Можно предположить, что в этой закрытой области располагалась низкая петля, соединяющая две ленты. Полученный на большом коронографе КрАО А.Н. Бабиным и А.Н. Коваль спектр в области H α показал, что в одном из оснований этой петли, располагающемся в полутени пятна, наблюдались быстрые (около 100 км/с) восходящие движения, а в другом — нисходящий медленный (5 км/с) поток [5]. Именно в этой низкой петле, по-видимому, произошли основные высокоэнергичные явления. В рассматриваемом случае выброс, вероятно, нарушил нормальное развитие вспышки и не позволил процессу распространиться вдоль нейтральной линии в северо-восточном направлении.

То, что этот выброс нарушил развитие вспышки, видно из гистерезисной диаграммы зависимости логарифма температуры от 1/2 логарифма меры

эмиссии “ $\lg T - 1/2 \lg EM$ ”. Приведенные на рис. 4 диаграммы были построены по минутным данным двух рентгеновских каналов спутника GOES-8. На них точки, наносимые через 1 мин, описывают поведение во времени термодинамических характеристик источника мягкого рентгеновского излучения в целом. Для рассматриваемой вспышки № 4 в момент 07 : 43 (рис. 2б), когда выброс вышел в нижнюю корону (высоты от 10 до 20 тыс. км), где предположительно в токовом слое должно было начаться постэруптивное энерговыделение, развитие вспышки, напротив, резко оборвалось (рис. 4г). Фаза затухания длится обычно часы, а не несколько минут, как в этом случае. После 07 : 45, происходит быстрое радиационное охлаждение плазмы в корональных петлях. Добавим, что начальная фаза выброса совпала по времени с кратковременным (несколько минут) импульсным микроволновым всплеском с максимумом радиопотока в 07 : 43 в диапазоне 9–15 ГГц.

По данным коронографов LASCO, с этой вспышкой был связан многокомпонентный КВМ, который наблюдался, начиная с 08 : 06. На пред-

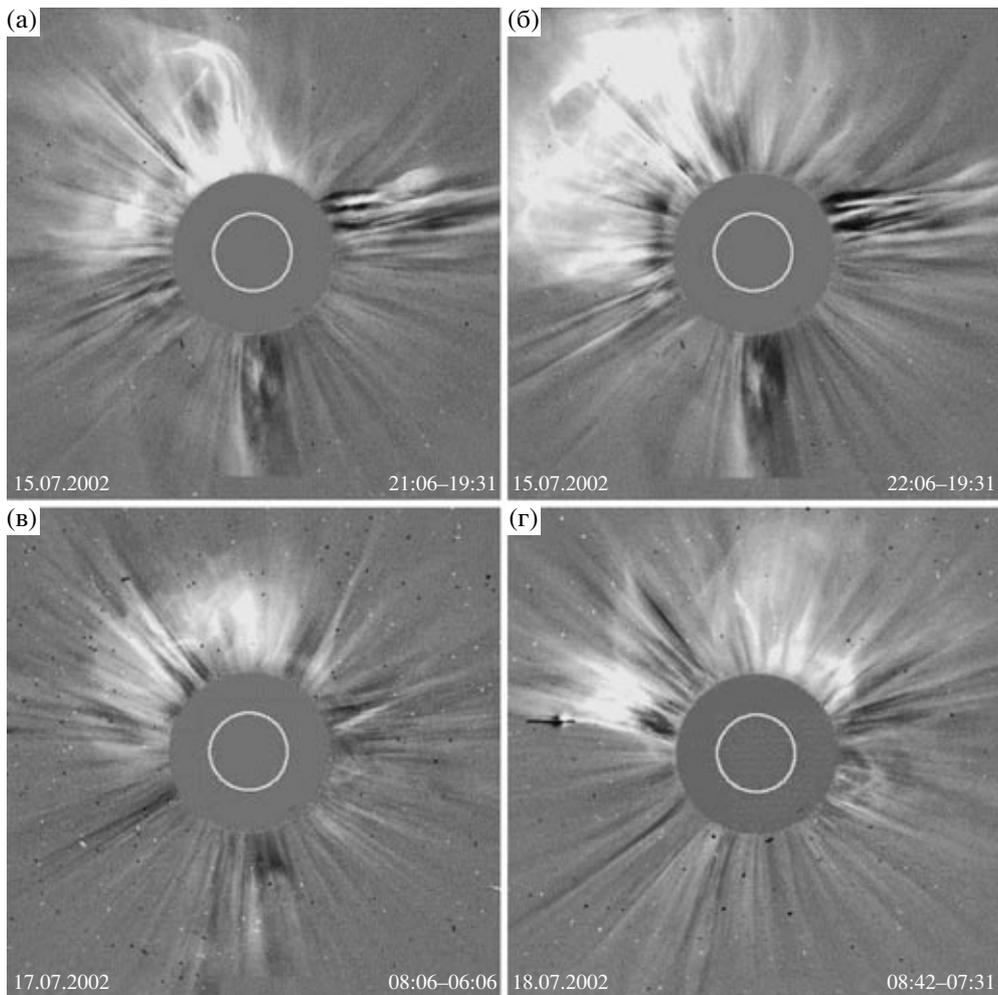


Рис. 5. Фиксированные разностные изображения с коронографа SOHO/LASCO/C2, иллюстрирующие КВМ типа частичного гало над северным сектором лимба с яркими элементами внутренней структуры, соответствующими хромосферным выбросам, в событиях № 1 (два КВМ) и № 3, № 4 за 15 и 18 июля 2002 г.

ставленных разностных изображениях (рис. 5г) он имел вид частичного гало со сравнительно слабым свечением вокруг всей северной половины затмевающего диска коронографа и включал в себя яркие внутренние структуры небольших угловых размеров над северным лимбом. Согласно каталогу КВМ, момент эрупции данного КВМ близок ко времени описанного выше выброса, а средняя скорость его фронта в северном направлении ≈ 1100 км/с. Исходя из характеристик наблюдаемых возмущений можно предполагать, что яркие узкие структуры КВМ над северным лимбом соответствуют выбросу, наблюдавшемуся в $H\alpha$ и в полосе 1600 \AA . Слабое гало связано как собственно с эрупцией высоких и протяженных корональных структур, так и с тем, что вещество распространяется в сторону наблюдателя. На эрупцию таких структур указывают, в частности, фиксированные разностные изображения

SOHO/EIT в канале 195 \AA (рис. 6б). Здесь эруптировавшие структуры видны в виде темных, долгоживущих (несколько часов) диммингов, образовавшихся на месте существовавших до события ярких структур. Выделяются, в частности, димминги, соответствующие внешней части систем петель между головным и хвостовым районами AR 10030, а также между головным районом этой области и окрестностями корональной дыры. Более того, обширный северный приполярный димминг указывает на эрупцию петель, простиравшихся над протяженным северным волокном F2 и связывавших AR 10030 с районом северного полюса (рис. 1е–1ж).

Существенно, что, как показывают данные, относящиеся к хромосфере ($H\alpha$, 1600 \AA) и нижней короне (171 и 195 \AA), очаг этой вспышки (элемент 3 на рис. 6б) был локализован в головной части AR 10030 (район R1 на рис. 1д), в месте вторже-

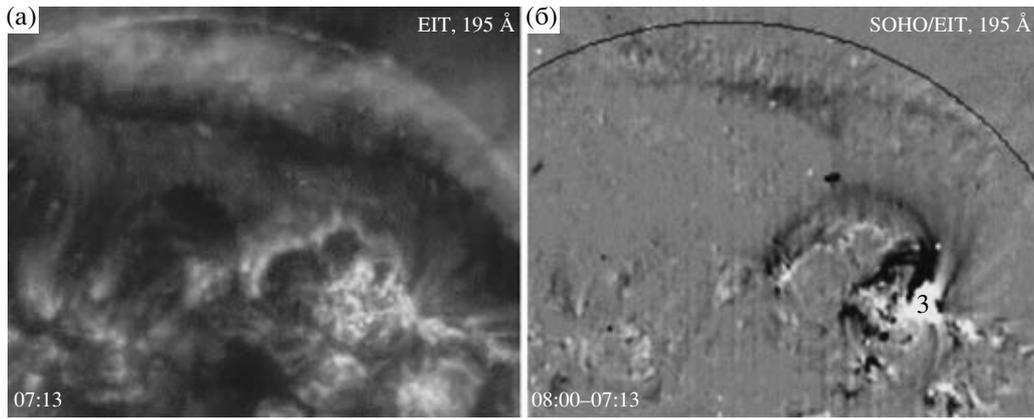


Рис. 6. Оригинальная (а) и разностная (б) гелиограммы северного сектора диска до и после быстрого события 18 июля 2002 г. (№ 4) в канале 195 Å по данным SOHO/EIT. На разностной гелиограмме яркая структура — ядро вспышки 3 в западной части области 10030 (район R1 на рис. 1д), а темные структуры — крупномасштабные димминги, связанные с КВМ.

ния поля южной полярности между двумя пятнами северной полярности и не затрагивал хвостовую часть области.

4. ДРУГИЕ БЫСТРЫЕ СОБЫТИЯ

Две другие быстрые вспышки 17 и утром 18 июля (соответственно № 2 и № 3 в таблице) возникли и развивались в том же месте активной области, что и рассмотренное выше событие № 4. Проведенное сопоставление магнитограмм MDI и изображений в канале 195 Å для событий № 2 и № 3 показывает, что ядра этих вспышек и источники выбросов снова располагались в головной части активной области, восточнее первого пятна (район R1 на рис. 1д), т.е. в месте возникновения выброса в событии № 4.

В мягком рентгеновском излучении вспышка № 2 имела колоколообразный временной профиль с максимумом в 07 : 13 (рис. 1б). Ее продолжительность (25 мин) несколько превышала длительность вспышки № 4, но нарастание и спад излучения были достаточно резкими, и в целом ее тоже следует классифицировать как быструю вспышку. В радиоизлучении на сантиметровых волнах вспышка № 2 зафиксирована как двухкомпонентный импульсный всплеск с сопоставимыми максимумами радиопотока в 07 : 03 и 07 : 13. При этом частотный спектр второго импульса был более жестким (высокочастотным), чем спектр первого импульса.

Оба эпизода энерговыделения во вспышке № 2 хорошо были видны в хромосферном и корональном излучении, например, в линии H α , в диапазоне 1600 Å и в совокупности линий в канале 195 Å. После первого импульса близ среднего из трех пятен развилась компактная двухленточная вспышка, длившаяся около 10 мин. На ее заключительной

стадии в 07 : 13 начал развиваться выброс 4, отчетливо проявившийся в конце одной из лент (рис. 7а, 7б). Этот выброс был по многим параметрам аналогичен выбросу в событии № 4, но был немного слабее его. Тем не менее, он затронул не только хромосферные слои, но и внешнюю часть системы высоких корональных петель, что можно видеть на рис. 7в. Он зародился в том же самом месте, примерно на 14000 км северо-западнее начального очага вспышки и был также направлен на север. При этом, как показывают наблюдения в H α , в последующие моменты времени крупномасштабный выброс приобрел характерную расщепленную на несколько полос структуру, подобную той, что наблюдалась в событии № 4; его взаимодействие с северным протяженным волокном было также аналогично в этих двух случаях. После этого выброса свечение корональных петель быстро затухло. Это могло быть связано как со слабостью выброса, так и с нарушением условий пересоединения магнитных силовых линий в токовом слое.

Судя по разностным гелиограммам EIT в канале 195 Å (рис. 7в), в данном событии диммингами оказались охваченными практически те же корональные структуры, что и в событии № 4. В частности, значительно уменьшилась яркость большей части крупномасштабных петель, простирающихся из зоны головных пятен, где произошла вспышка и имел место выброс, в район хвостового пятна и восточной корональной дыры. На разностных фильмах, димминговые возмущения видны также (правда, в меньшей степени, чем в событии № 4) в северном приполярном районе, что снова указывает на эрупцию крупномасштабных петель, расположенных над протяженным северным волокном F2.

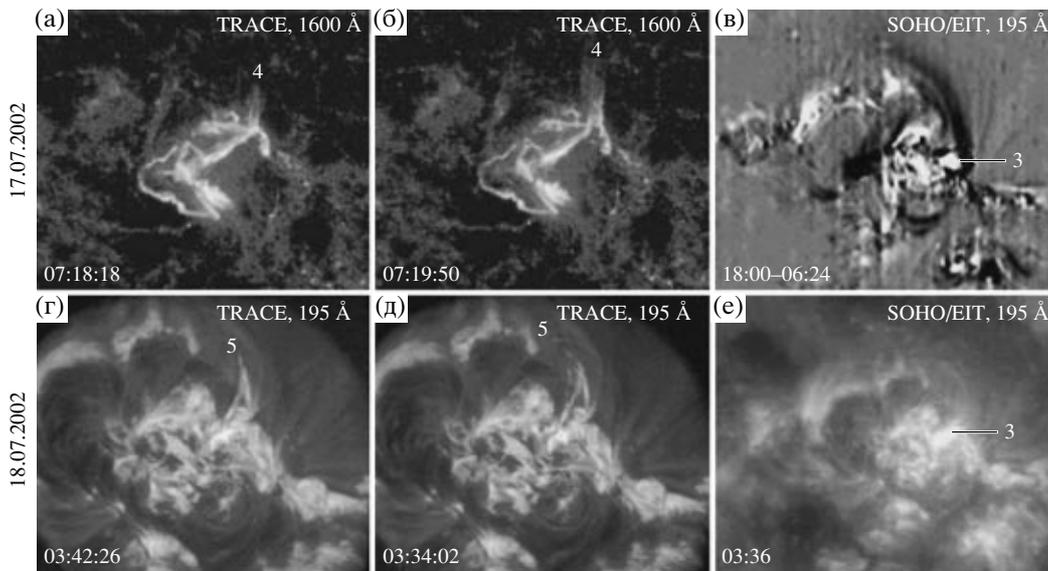


Рис. 7. Быстрые события 17 (№ 2; верхний ряд диаграмм) и 18 (№ 3; нижний ряд диаграмм) июля 2002 г. Видны коллимированные выбросы 4 и 5 на гелиограммах TRACE соответственно в диапазонах 1600 \AA (а, б) и 195 \AA (г, д). Разностная (в) и оригинальная (е) гелиограммы SOHO/EIT в канале 195 \AA показывают темные димминги и локализацию яркого ядра 3 обеих вспышек в западной части области 10030 (район R1 на рис. 1д).

Сопровождающий эту вспышку КВМ также был во многом аналогичен КВМ в событии № 4. Его первая регистрация на коронографе LASCO/C2 относится к 07:31, когда КВМ появился над северным полюсом в виде сравнительно небольшой, довольно диффузной структуры петлеобразной формы. В течение последующих нескольких десятков минут (рис. 5в) яркость и размеры КВМ существенно увеличились, он охватил весь северо-восточный сектор лимба и приобрел вид частичного гало с рядом ярких внутренних деталей. По оценкам, приведенным в каталоге, средняя скорость данного КВМ была $\approx 715 \text{ км/с}$. Как и в событии № 4, внешняя часть гало, по-видимому, соответствует эрупции высоких корональных структур, индикатором которых явились описанные выше удаленные крупномасштабные УФ-димминги, наблюдавшиеся в канале 195 \AA . Внутренние же яркие структуры КВМ, в частности его наиболее яркая компонента над северным полюсом, скорее всего, соответствуют описанному выше выбросу плазмы из западной части AR 10030.

Утреннее быстрое событие 18 июля № 3 с максимумом мягкого рентгеновского излучения в 03:37 представляло собой компактное уярчение все того же сравнительно небольшого участка 3 в западной части активной области, где имело место импульсное энерговыделение в предыдущем событии № 2 и в последующем быстром событии № 4. Это можно видеть на оригинальном

снимке EIT в канале 195 \AA (рис. 7е) и на соответствующих хромосферных изображениях. В последующие моменты времени (после 03:42) наблюдалась компактная двухленточная вспышка. К сожалению, для этого события данные о самом начале вспышки отсутствуют, и первоначальный выброс может быть нами пропущен. В то же время выброс материи, зарегистрированный на TRACE после 03:42, по-видимому, отличался от двух уже рассмотренных случаев. Фильм в диапазоне 195 \AA показывает, что первоначально наблюдалось движение уярчения вдоль первой крупномасштабной корональной петли, которая видна на рис. 7в,е как на разностном снимке в событии 17 июля и на оригинальном изображении 18 июля. Это движение сифонного типа было направлено от среднего пятна на северо-восток. Затем наблюдалось движение уярчения в соседней большой петле в противоположном направлении. Создается впечатление, что, в отличие от предыдущих случаев, вещество не выбрасывалось наружу, а перераспределялось внутри высокой системы арок. Это согласуется с тем, что КВМ, а также крупномасштабный димминг в северном приполярном районе в данном случае отсутствовали. В микроволновом диапазоне событие № 3 зарегистрировано в виде простого импульсного всплеска с максимумом в 03:33.

Влияние выбросов на развитие быстрых процессов в событиях № 2 и № 3 прослеживается и в этих случаях на соответствующих гистерезисных диаграммах “lg $T - 1/2 \lg EM$ ”. В событии

№ 2 (рис. 4б) развитие выброса на заключительной стадии вспышки в 07 : 17 привело к переходу явления в постэруптивную фазу. Это аналогично тому, что произошло в событии № 4, но в данном случае выброс нарушил только часть корональной системы петель, в то время как оставшиеся петли продолжали высвечиваться при небольшом поступлении энергии в их вершины. Диаграмма события № 3 (рис. 4в) указывает на корональный характер развития явления. Однако и здесь в 03 : 38, после второго пика микроволнового излучения, предположительно вызванного выбросом, развитие вспышки резко затормозилось. В этом случае, однако, часть петель, расположенная, по видимому, за пределами активной области, после 03 : 47 достаточно долгое время продолжала высвечиваться. Согласно [17], различие наклонов аппроксимирующих прямых на стадии спада в быстрых событиях № 2–№ 4, обусловлено тем, насколько радиационные потери в петлях компенсируются нагревом за счет поступления энергии из источника постэруптивного процесса.

5. ДЛИТЕЛЬНАЯ ВСПЫШКА 15 ИЮЛЯ

Хронологически первая, длительная вспышка 15 июля (№ 1), по-видимому, привела к такому изменению магнитной конфигурации, которое обусловило появление в последующем коротких компактных вспышек. Это продолжительное событие, которое в целом характеризовалось оптическим баллом 3В, включало в себя три основных выброса, соответствующую быструю вспышечную компоненту и последовавшую постэруптивную фазу.

Начальная быстрая компонента в интервале 20 : 00–20 : 03 состояла из нескольких компактных корональных петель. Как и другие рассмотренные выше быстрые вспышки, она возникла и развивалась в западной части области, в месте вторжения поля южной полярности между двумя пятнами северной полярности (район R1 на рис. 1д). Последовательное развитие отдельных эпизодов этого сложного события прослежено нами, в основном, по фильмам TRACE в диапазоне 1600 Å, а в [18] использовалась также информация об изображениях в коротковолновой линии иона C IV. Первый выброс вещества наблюдался после 20 : 03 в диапазоне 1600 Å (таблица), и его скорость за 0.5 мин достигла максимального значения 370 км/с. Затем этот выброс был поглощен следующим.

Крупномасштабное движение вокруг основного ядра вспышки в 20 : 03 : 49 дало начало большому выбросу в северном направлении. Это видно по хромосферным данным, например, в диапазоне 1600 Å (рис. 8а, 8б). Начало этого выброса б характеризовалось очень сильным вращением

плазмы. Затем этот выброс стал распространяться в северном направлении, что привело к обычному развитию компактной двухленточной вспышки. Одна из небольших лент включала в себя ядро вспышки 3, а другая располагалась к востоку от нее. Свечение этих лент длилось 15 мин.

Этот мощный выброс включал спиральное образование типа жгута (рис. 8а). Один конец этой спирали поднимался несколько быстрее другого, и уже через одну минуту после его возникновения скорость достигла 700 км/с. Этот выброс кратко обсужден в [19], а более подробно сам выброс, сценарий и модель первой части вспышечного процесса рассмотрены в [18, 20]. Независимо измеренное нами по фильму TRACE в диапазоне 1600 Å изменение скорости во времени фактически совпадает с результатом [18]. В [18, 20] характеристики выброса были сопоставлены с возможными теоретическими моделями вспышек, на чем мы здесь подробно не останавливаемся. Именно этот выброс дал начало первому КВМ в северном направлении (скорость 1150 км/с; таблица).

В последующем (20 : 10) еще один сравнительно слабый дополнительный выброс распространялся в северном направлении и сопровождался формированием к 20 : 14–20 : 16 другой, северной пары лент. Фактически к концу этого эпизода вспышки закончилась импульсная часть всего события.

В 20 : 16 началось новое существенное явление в основном ядре вспышки, которое к 20 : 23 : 30–20 : 24 : 30 привело к развитию еще одной взрывной фазы в ядре вспышки и появлению мощного выброса 7 (рис. 8в, 8г). В отличие от всех предыдущих выбросов, этот выброс распространялся в восточном направлении. Важно, что данный выброс не был коллимированным, как описанные выше, а представлял собой большую систему петель и захватывал широкий телесный угол. При этом уже на начальной стадии скорость выброса в канале 1600 Å быстро возрастала от 70 до 310 км/с в 20 : 25 и 20 : 28 соответственно.

Можно сравнить свойства основных выбросов 6 и 7. Из таблицы видно, что максимальные наблюдаемые скорости в картинной плоскости отличаются более, чем в два раза. Однако это различие связано не столько с реальным различием скоростей течения плазмы в них, сколько с ориентацией вектора скоростей по отношению к лучу зрения. Это следует из нескольких соображений, в частности, из близости скоростей соответствующих КВМ (1150 и 1300 км/с; таблица). Иными словами, все выбросы, направленные на север, имели большие проекции на картинную плоскость, чем восточный выброс.

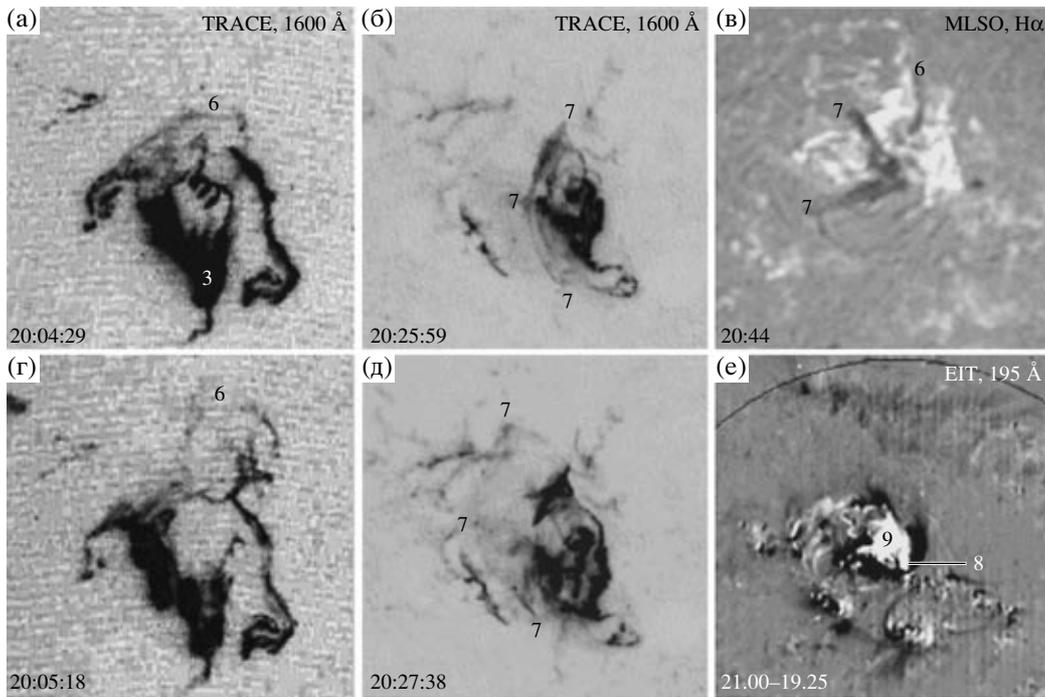


Рис. 8. Левый и центральный ряд диаграмм — развитие коллимированного выброса 6 в северном направлении (а, б) и широкого выброса 7 в восточном направлении (в, г) в событии 15 июля 2002 г. (№ 1) по данным TRACE в диапазоне 1600 Å (негатив). Правый ряд диаграмм вид обоих выбросов в линии H α по данным обсерватории Мауна Лоа (д) и разностная гелиограмма SOHO/EIT в канале 195 Å иллюстрирующая темные димминги, а также локализацию компактного источника 8 быстрой компоненты и протяженной постэруптивной аркады 9 соответственно в головной (район R1 на рис. 1д) и хвостовой (район R2) частях области 10030 (е).

Большие выбросы 6 и 7 видны в линии H α (рис. 8д). Если вышеперечисленные быстрые события совершенно не затрагивали спокойного волокна, которое находилось восточнее ядра вспышки, то восточный выброс, вероятнее всего, являлся потоком достаточно холодного газа этого волокна. Наблюдаемый на фильмах в 1600 Å и H α характер поглощения хромосферного излучения — быстрый переход от резких темных петель к слабым, более диффузным образованиям — свидетельствует о постепенном увеличении температуры в процессе выброса.

Описанная активность сопровождалась двумя последовательными крупными КВМ типа частичного гало, которые имели петлеобразную форму с рядом ярких внутренних элементов и максимальным свечением над северо-восточным сектором лимба (рис. 5а, 5б). Первый из этих КВМ регистрировался начиная с 20 : 30, содержал яркие структуры на своем западном фланге (в районе северного полюса) и поднимался в короне со средней скоростью 1150 км/с. Второй, более интенсивный КВМ стал видимым в 21 : 30, включал в себя ряд ярких структур, распределенных по всей ширине петлеобразного транзиента, и имел скорость 1300 км/с. Указанные характеристики этих двух

КВМ дают основания связать их соответственно с северным и восточным выбросами, описанными выше. Что касается УФ-диммингов, обусловленных этими хромосферными выбросами и КВМ, то, как показывает разностное изображение в канале 195 Å (рис. 8е), существенные понижения яркости охватили ближайшие окрестности AR 10030, систему петель, простирающуюся в район восточной корональной дыры, а также структуры, локализованные южнее активной области и севернее протяженного волокна F2. Это означает, что в эруптивные процессы были вовлечены как локальные, внутренние (низколежащие) структуры, составляющие магнитосферу самой AR 10030, так и гораздо более крупномасштабные структуры глобальной солнечной магнитосферы.

Следствием большого восточного выброса и соответствующего ему второго КВМ явилось то, что после них, вслед за ядром быстрой компоненты 8, развилась достаточно крупномасштабная система постэруптивных петель 9 (рис. 8е). Важным отличием этой системы петель от всех быстрых вспышек было то, что она располагалась над сравнительно протяженной нейтральной линией магнитного поля в восточной части активной области, между центральным пятном северной полярности

и хвостовым пятном южной полярности (район R2 на рис. 1д). Развитие именно этой постэруптивной системы обуславливает наличие второй продолжительной (LDE) компоненты мягкого рентгеновского всплеска. На гистерезисной диаграмме (рис. 4а) видно, что в то время как выброс 6 (рис. 8а, 8б) в 20 : 04 привел к фактическому прекращению вспышечного процесса, система петель, сформировавшаяся после выброса 7 (рис. 8в–8д) в 20 : 25, характеризовалась достаточно большой мерой эмиссии, сохранявшейся в течение нескольких часов.

В микроволновом радиоизлучении быстрая и постэруптивная стадии события № 1 имели характеристики, типичные для такого рода событий. Быстрой компоненте соответствовал интенсивный двухкомпонентный импульсный всплеск с максимумом в 20 : 04 и жестким (высокочастотным) спектром, а постэруптивной — продолжительный всплеск меньшей интенсивности с гладким временным профилем и мягким (низкочастотным) спектром. Заметим, что радиоданные этого события обсуждаются в [18].

6. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Основные наблюдательные результаты проведенного рассмотрения можно резюмировать следующим образом.

1. Все быстрые вспышки (события № 2–№ 4, а также импульсная компонента события № 1) происходили в одном и том же районе в головной (западной) части AR 10030, в месте вторжения поля южной полярности между двумя пятнами северной полярности, и сопровождалась крупными коллимированными или узкими выбросами плазмы в северном направлении. Здесь проявляется выраженная гомологичность рассмотренных быстрых событий. В трех из этих случаев выбросы прослеживались как яркие узкие элементы в соответствующих секторах широкоугольных КВМ, связанных с эрупцией крупномасштабных структур вне AR 10030.

2. Продолжительная LDE-компонента с долгоживущей постэруптивной аркадой, локализованной над сравнительно протяженной нейтральной линией в хвостовой (восточной) части AR 10030, имела место только в событии № 1 и последовала за крупномасштабным выбросом, который так же, как и в случае быстрых вспышек, возник в головной части области, но, в отличие от них, распространялся в широком конусе в восточном направлении, в том числе по всему угловому сектору связанного с ним яркого крупномасштабного КВМ.

Сейчас наблюдения позволяют предположить, что внутри активной области или комплекса активности существует такой небольшой участок (точка) на нейтральной линии продольного магнитного

поля, где развиваются основные высокоэнергичные явления [21]. Будем условно называть петлю, которая проходит через эту точку почти перпендикулярно нейтральной линии, энергетическим ядром вспышки. Есть основания отождествлять эту линию с проекцией сепаратора на поверхность фотосферы. Вероятнее всего процесс пересоединения наиболее эффективен именно вблизи сепаратора [4, 22].

Длительные LDE-вспышки происходят в случаях, когда создаются условия для образования и развития достаточно протяженной постэруптивной системы петель, в которой в течение часов происходит или дополнительный нагрев уже существующих петель, или формирование все новых и новых петель, заполняемых горячей плазмой. В случаях же, когда вспышечный процесс сводится к достаточно мощному первичному энерговыделению в сравнительно небольшом, пространственно ограниченном районе активной области вблизи энергетического ядра вспышки, излучение, генерируемое в одной или нескольких петлях без дополнительного энерговыделения, быстро высвечивается в течение десятков минут, и реализуется быстрая вспышка.

Важную роль в определении длительности вспышек играют выбросы. В случае мощных вспышек словом выброс (эрупция) мы называем такое истечение плазмы, которое наблюдается в самых нижних слоях солнечной атмосферы и постепенно трансформируется в КВМ. Оговоримся, что это может быть или выброс плазмы с хромосферными температурами, включая эрупцию волокна, или выброс плотных корональных петель. Будем здесь включать в понятие “выброс” импульсную фазу. Действительно, взрывное испарение плазмы после воздействия на хромосферные слои в основаниях петель ускоренных электронов (в некоторых случаях — потока тепла) приводит к появлению восходящего потока горячей плазмы в обоих или в одном основании петли. Обычно этот горячий газ заполняет петлю и не выходит за ее пределы. Однако в некоторых случаях, например, при большом числе ускоренных электронов, петля разрывается, и плазма выходит наружу. В такой постановке вопроса фактически каждый мощный выброс сопровождается формированием системы корональных петель, проявляющейся в хромосфере в виде двух лент. В общем мощном нестационарном процессе крупномасштабный выброс может приводить к раскрытию части силовых линий, как это предположили Копп и Пнейман [3], и при последующей релаксации способствовать процессу постэруптивного пересоединения. Рассмотрим в каких случаях после выбросов система петель существует много часов, а в каких плазма сразу высвечивается.

В случаях, когда постэруптивная фаза практически отсутствует даже при мощном выбросе, это может быть связано с тем, что он распространяется в достаточно малом телесном угле. Это обеспечивает формирование корональных петель только в ограниченном участке над нейтральной линией. Пересоединение в токовом слое в районе выброса реализуется в течение небольшого времени, и затем в сформировавшиеся корональные петли дополнительная энергия не поступает. С этим связано то, что после большинства таких выбросов корональные петли образуются, но свободно высвечиваются.

Выбросы могут приводить также к нарушению нормального развития двухленточной вспышки и препятствовать ее переходу в длительное событие. Самое резкое воздействие состоит просто в разрушении области токового слоя под воздействием другого (внешнего) выброса. Первая интерпретация события № 4 в [5] как раз и состояла в таком разрушении ядра вспышки вследствие низко возникшего, удачно ориентированного выброса. Вообще говоря, появление второго выброса, внешнего по отношению к вспышке, может прервать естественное развитие вспышечного процесса. Такую ситуацию можно было предположить в импульсной части события 15 июля 2002 г., содержащей два выброса (таблица). Однако гораздо чаще может реализоваться ситуация, при которой в результате выброса нарушаются условия или для самого существования токового слоя, или для распространения процесса вдоль нейтральной линии в обе стороны от ядра вспышки.

В результате же выброса в широком телесном угле токовый слой может образоваться над достаточно протяженным участком нейтральной линии. Это может происходить как при сильных вспышках с мощной импульсной фазой, так при выбросе больших волокон без импульсных проявлений. В таком случае, если при формировании КВМ образуется крупномасштабный токовый слой (как это, например, видно в расчетах [23]), то на довольно низких высотах формируется протяженная система постэруптивных петель. Дополнительный нагрев плазмы, заключенной в этих петлях, энергией, поступающей из токового слоя, обеспечивает длительное существование аркады на всей ее протяженности.

Таким образом, развитие длительной вспышки происходит после достаточно мощного выброса в широком телесном угле. Узкие, коллимированные выбросы приводят к последующему развитию системы корональных петель (и, соответственно, двухленточной структуры на низких высотах), но время их существования мало.

Важный дополнительный фактор, который может играть существенную роль в развитии длительных вспышек, рассмотрен в [24] при анализе баланса энергии и массы плазмы в крупномасштабных арочных системах с использованием результатов наблюдений, полученных на спутнике КОРОНАС-Ф [25]. В частности, было обращено внимание на возможную большую роль выброса и последующего падения вещества в формировании и обеспечении длительного существования постэруптивных петель. Важными оказываются не только количество выброшенной плазмы, но и постепенное формирование из нее на значительных высотах в короне облака горячей плазмы. Последующее падение вещества на область замкнутых силовых линий, в частности, над нейтральной линией магнитного поля, может поддерживать в течение длительного времени постэруптивную систему и ее мягкое рентгеновское излучение. При этом пересоединение магнитных силовых линий может играть большую роль в местах, примыкающих к ядру вспышки (вблизи пятен), в то время как при значительных удалениях от ядра вспышки начинает преобладать эффект падения вещества.

Дальнейшее исследование проблемы быстрых и длительных вспышек предполагает проведение более детального анализа роли конфигурации активной области и ее расположения относительно линии раздела полярностей крупномасштабного поля.

Авторы благодарны коллективам спутниковых инструментов SOHO/EIT, LASCO и MDI (SOHO — проект международного сотрудничества ESA и NASA), TRACE, GOES, наземных солнечных обсерваторий Биг Бэр и Мауна Лоа за данные, использованные при анализе. Авторы признательны В.В. Гречневу (ИСЗФ, Иркутск) за IDL-программы формирования разностных изображений и О.Г. Бадалян (ИЗМИРАН, Троицк, Моск. обл.) за построение гистерезисных диаграмм. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 05-02-17105 и 06-02-16106) и Министерства образования и науки РФ (грант НШ-7495.2006.2), а также программы фундаментальных исследований Президиума РАН “Солнечная активность и физические процессы в системе Солнце-Земля” и программы фундаментальных исследований Отделения физических наук РАН “Плазменная гелиофизика”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. J. Sakai and C. De Jager, Space Sci. Rev. **77**, 1 (1996).
2. B. N. Dwivedi, H. S. Hudson, S. R. Kane, and Z. Svestka, Solar Phys. **90**, 331 (1984).

3. R. A. Kopp and G. W. Pneuman, *Solar Phys.* **50**, 85 (1976).
4. Т. Форбс, Э. Прист, *Магнитное пересоединение* (М.: Наука, 2005).
5. А. Н. Шаховская, М. А. Лившиц, *Изв. Крымск. астрофиз. обсерв.* **102**, (2006).
6. А. Н. Бабин, *Изв. Крымск. астрофиз. обсерв.* **52**, 79 (1974).
7. А. Н. Бабин, А. Н. Коваль, *Изв. Крымск. астрофиз. обсерв.* **73**, 3 (1985).
8. A. N. Shakhovskaya, V. I. Abramenko, V. B. Yurchyshyn, *Solar Phys.* **207**, 369 (2002).
9. B. N. Handy, L. W. Acton, C. C. Kankelborg, *et al.*, *Solar Phys.* **187**, 229 (1999).
10. J.-P. Delaboudinière, G. E. Artzner, J. Brunaud, *et al.*, *Solar Phys.* **162**, 291 (1995).
11. И. М. Черток, В. В. Гречнев, *Астрон. журн.* **80**, 162 (2003).
12. I. M. Chertok and V. V. Grechnev, *Solar Phys.* **229**, 95 (2005).
13. G. E. Brueckner, R. A. Howard, M. J. Koomen, *et al.*, *Solar Phys.* **162**, 357 (1995).
14. S. Yashiro, N. Gopalswamy, G. Michalek, *et al.*, *J. Geophys. Res.* **109**, A07105 (2004).
15. H. A. Garcia, *Solar Phys.* **154**, 275 (1994).
16. P. H. Scherrer, R. S. Bogart, R. I. Bush, *et al.*, *Solar Phys.* **162**, 129 (1995).
17. М. А. Лившиц, О. Г. Бадалян, *Астрон. журн.* **81**, 1138 (2004).
18. G. A. Gary and R. L. Moore, *Astrophys. J.* **611**, 545 (2004).
19. Y. Liu, Y. Jiang, H. Ji, *et al.*, *Astrophys. J.* **593**, L137 (2003).
20. L. K. Harra, P. Démoulin, C. H. Mandrini, *et al.*, *Astron. and Astrophys.* **438**, 1099 (2005).
21. М. А. Лившиц, А. В. Белов, *Астрон. журн.* **81**, 732 (2004).
22. О. Г. Ден, *Астрон. журн.* **83** (2007, в печати).
23. Z. Mikic, J. A. Linker, V. Titov, *et al.*, in: *Modeling of CMEs originating in active regions*. The European Solar Physics Meeting 11, Leuven, Belgium, September 12–16, 2005 (2005, in print).
24. М. А. Livshits, in: *Interrelation between processes during impulsive and post-eruptive phases as it can be traced from the CORONAS-F Data*. RESIK–RHESSI–SPIRIT Workshop, Wroclaw, December 6–8, 2005 (2005, in print).
25. V. V. Grechnev, A. M. Uralov, V. G. Zandanov, *et al.*, *Publ. Astron. Soc. Japan.* **58**, 55 (2006).

The Role of Plasma Ejections in the Development of Major Solar Flares of Various Durations

A. N. Shakhovskaya, M. A. Livshits, and I. M. Chertok

Recent observations indicate that relatively strong plasma ejections are accompanied by the formation of systems of coronal loops with two glowing ribbons near their footpoints. However, while a two-ribbon flare can last for many hours in some cases, for example, in soft X-rays, it can decay within tens of minutes in other cases. We study here factors affecting the durations of flares using four major flares occurring in July 15–18, 2002 as examples. Diverse ground-based and satellite observations are used to show that short-duration events included collimated (narrow) plasma ejections directed to the north and the subsequent formation of compact loops in the leading part of the active region. During one of the events, a powerful eastward ejection in a wide solid angle was followed by the formation of an extended arch system in the trailing part, which determined the long duration of the flare. It is proposed that systems of coronal loops do form in events involving collimated (narrow) ejections and corresponding narrow features in coronal mass ejections (CMEs), but that an eruptive energy release either does not occur or is very weak, so that no energy goes downward from this region and there is free plasma emission in the coronal loops. In contrast to such rapid flares, wide ejections and bright, large-scale CMEs are accompanied by the formation and prolonged existence of an extended arch system. Thus, powerful nonstationary solar processes involve a large-scale CME and the flare itself, with the pattern of a particular event determined by the reconnection scenario and the evolution of the ejected plasma.