

УДК 523.98

ДЛИТЕЛЬНЫЙ НАГРЕВ ПЛАЗМЫ В СОЛНЕЧНЫХ МИКРОВСПЫШКАХ РЕНТГЕНОВСКОГО КЛАССА А1.0 И НИЖЕ

© 2013 г. А. С. Кириченко*, С. А. Богачев

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

Поступила в редакцию 14.05.2013 г.

Представлены результаты исследования трех солнечных микровспышек рентгеновского класса порядка А1.0 и ниже, наблюдавшихся в минимуме солнечной активности в 2009 году: вспышка 19.04.2009 (класс А0.38), вспышка 24.06.2009 (класс А0.47), вспышка 18.07.2009 (класс А2.2). Отличительной особенностью данных событий от других микровспышек низких рентгеновских классов являлось поддержание высокой температуры плазмы ($T \gtrsim 4$ МК) на фазе спада излучения спустя значительное время после максимума вспышки. Времена жизни высокотемпературного источника излучения в короне во всех трех случаях существенно превышают времена его теплопроводного и лучистого охлаждения, а тепловая энергия, выделяемая на фазе спада вспышки, на порядок превышает тепловую энергию, высвобождаемую во время ее импульсной фазы. Высказано предположение, что длительное поддержание высокой температуры плазмы в микровспышках низких рентгеновских классов может осуществляться за счет процесса магнитного пересоединения, связанного с выбросами массы из области вспышки. Время жизни горячей плазмы в короне в этом случае может заметно превышать время охлаждения плазмы. Исследование показало, что во всех трех исследованных микровспышках действительно происходила эрупция вещества.

Ключевые слова: Солнце, микровспышки, высокотемпературная плазма.

DOI: 10.7868/S0320010813110041

ВВЕДЕНИЕ

Солнечные микровспышки представляют собой одни из самых мелкомасштабных процессов энерговыделения, наблюдаемых в атмосфере Солнца. Размер эмиссионных ядер микровспышек обычно составляет не более 10 угл. сек, а время жизни не превышает нескольких десятков минут. Полная энергия, высвобождаемая во время микровспышек, лежит в диапазоне от 10^{27} до 10^{30} эрг (Кристе и др., 2008).

Впервые слабые вспышечно-подобные явления (субвспышки) были обнаружены на Солнце в линии водорода $H\alpha$ (Смит, Смит, 1963). Термин “микровспышка” был введен в начале 1980-х гг. Шаде и др. (1983) и Лином и др. (1984) для субвспышек, наблюдаемых в рентгеновском диапазоне спектра. В наши дни излучение микровспышек регистрируется почти на всех длинах волн: в микроволновом излучении, в вакуумном УФ-диапазоне спектра, а также в мягкой и жесткой рентгеновских областях.

В линии $H\alpha$ микровспышка обычно имеет максимальный размер, тогда как в рентгеновском диапазоне, как правило, наблюдаются лишь отдельные эмиссионные ядра, обычно соответствующие наиболее ярким узлам на $H\alpha$ -изображении вспышки (Йокояма, Шибата, 1995).

В настоящее время доминирует представление, что физические механизмы, ответственные за формирование микровспышек, совпадают с механизмами больших вспышек (с полной энергией 10^{30} эрг и выше). Микровспышки, насколько можно судить по данным наблюдений, происходят в областях повышенного магнитного поля с непотенциальной магнитной конфигурацией и являются следствием магнитного пересоединения (Нерейн, Ульмшнедер, 1990). Наблюдательные проявления микровспышек в целом те же, что и проявления больших вспышек: нагрев плазмы, ускорение частиц, формирование теплового и нетеплового излучения (Ханна и др., 2008). При этом нетепловая компонента, соответствующая наиболее энергичной импульсной фазе вспышки, пока регистрируется лишь в относительно небольшой доле событий. Последнее, скорее всего, связано с приборными

* Электронный адрес: kirichenko@lebedev.ru

ограничениями при регистрации слабых потоков рентгеновского излучения.

В соответствии со сложившимися представлениями считается, что высокотемпературная вспышечная плазма в короне может формироваться двумя путями (Ашванден, 2004). Первый — это хромосферное испарение, при котором ускоренные электроны, попадая из области ускорения в плотные нижние слои солнечной атмосферы, нагревают их и вызывают их газодинамическое расширение вверх в солнечную корону (Ашванден и др., 2007). Горячая плазма в короне появляется в такой модели с некоторым запаздыванием после начала вспышки и находится *внутри* вспышечных петель. Второй возможностью, противоположной первому механизму, является прямой нагрев плазмы в короне. Плазма высокой температуры в этом случае появляется в короне во время импульсной фазы вспышки и наблюдается *над* вспышечными петлями вблизи их вершины (Цунета и др., 1997). Редким (возможно, единственным) микрособытием, в котором был достоверно обнаружен прямой нагрев плазмы в короне, является вспышка уровня В7.6 по шкале GOES от 7 июня 2007 г., в которой по совместным данным RHESSI и Hinode был обнаружен корональный источник излучения с температурой около 15 МК (Милиган, 2008). Хромосферное испарение в микровспышках регистрировалось несколькими авторами, в частности Брозисом, Холманом (2009), Милиганом (2008) и Ченом, Дингом (2010). В последней работе для вспышки класса В1.4 от 7 декабря 2007 года была измерена температура испаряющейся плазмы, которая составила от 1 до 2.5 МК.

В настоящей работе мы приводим свидетельства прямого нагрева плазмы в трех солнечных микровспышках рекордно низких рентгеновских классов — порядка А1.0 и ниже. Во всех трех событиях мы не просто устанавливаем факт нагрева плазмы в столь слабых событиях, но и показываем, что высокая температура в области микровспышки поддерживается спустя десятки минут после окончания импульсной фазы вспышки, что заметно превышает расчетные времена теплопроводного и лучистого охлаждения плазмы. В качестве возможного объяснения мы предполагаем, что столь длительный нагрев плазмы может обеспечиваться процессом магнитного пересоединения, связанного с выбросом плазмы из области вспышки. Свидетельства эрупций обнаружены нами во всех трех исследованных вспышках.

ДАННЫЕ И ОБРАБОТКА

В статье используются данные, полученные в ходе проведения эксперимента ТЕСИС/КОРОНАС—Фотон с февраля по ноябрь 2009 г. Пери-

од работы спутника совпал с глубоким минимумом активности между максимумами 23-го и 24-го солнечных циклов. Особенно низким уровень активности был с февраля по июль 2009 г. За это время на Солнце наблюдалось всего 13 активных областей по каталогу NOAA, а уровень мягкого рентгеновского излучения в диапазоне 1–8 Å большую часть времени находился под порогом чувствительности мониторов на спутниках GOES. Такие условия оказались весьма благоприятными для регистрации микровспышек, в особенности наиболее слабых из них, рентгеновского класса А1.0.

Для исследования мы использовали данные с трех приборов, входивших в состав комплекса научной аппаратуры ТЕСИС: 1) изображающий спектрогелиометр MISH, предоставляющий монохроматические изображения Солнца в резонансном дублете водородоподобного иона MgXII λ 8.419, 8.425 Å угловым разрешением около 2'' на пиксель и полем зрения прибора 1°15'; 2) телескоп FET для получения изображений полного диска Солнца в линии железа FeIX λ 171 Å с пространственным разрешением 1.7'' на пиксель; поле зрения прибора — 1°; 3) спектрофотометр SphinX для измерения потока мягкого рентгеновского излучения Солнца в энергетическом диапазоне от 0.5 до 15 кэВ (диапазон разбит на 256 каналов). Также привлекались данные по потоку солнечного излучения в диапазоне 1–8 Å со спутников GOES (США), находящиеся в открытом доступе.

В целом работа с данными осуществлялась следующим образом. Для первоначального поиска событий нагрева плазмы использовались изображения прибора MISH в линии MgXII. Данная линия является достаточно высокотемпературной, так как сколь-либо заметный уровень излучения в ней наблюдается при нагреве излучающей плазмы до температуры не менее 4 МК. Максимум температурной чувствительности находится в области температур 8–10 МК. Прибор в целом является весьма точным индикатором плазмы высокой температуры, так как сам факт регистрации с его помощью источника излучения свидетельствует о том, что температура здесь составляет не менее 4–5 МК. Верхняя граница температуры по данным MISH без привлечения других данных не определяется.

Из периода наиболее низкой активности Солнца (с февраля по июль 2009 г.) нами были исключены первые два месяца, в течение которых временное разрешение прибора MISH не превышало 2 ч и исследование микровспышек было невозможно. Из оставшегося периода (апрель—июль 2009 года) были выбраны одиночные вспышки (не накладывающиеся на фазу спада другого события в этой же

области), во время которых было зарегистрировано не менее двух изображений высокотемпературного источника излучения.

В первую очередь нас интересовали слабые события, в которых высокотемпературный источник излучения существует длительное время после максимума вспышки. Наблюдения GOES в диапазоне 1–8 Å, которые обычно используются для определения времени максимума и рентгеновского класса вспышки, не были особенно полезны, так как из-за низкого уровня активности поток рентгеновского излучения Солнца большую часть времени находился под порогом чувствительности GOES. По этой причине мы использовали данные спектрофотометра SphinX/ТЕСИС, обладающего гораздо более высокой чувствительностью. Временные профили в диапазоне 1–8 Å по данным SphinX мы строили самостоятельно, используя программное обеспечение, предоставленное авторским коллективом проекта. По итогам этого анализа нами были отобраны три микровспышки рентгеновского класса ниже или порядка A1.0, представленные в настоящей работе: событие уровня A0.38 от 19 апреля 2009 г.; событие уровня A0.47 от 24 июня 2009 г. и событие уровня A2.2 от 18 июля 2009 г.

Телескопические данные (изображения полного диска Солнца в линии FeIX 171 Å прибора FET/ТЕСИС) использовались нами для обнаружения активных областей, ответственных за формирование микровспышки (на изображениях MISH солнечный диск отсутствует), а также для построения разностных изображений. Разностные изображения образовывались путем вычитания из серии последовательных кадров с условными номерами 1, 2, ..., N предшествующего им фиксированного кадра с номером 0. Кадр 0 соответствовал моменту 'до начала вспышки', т.е. представлял собой невозмущенную корону, а кадры 1, ..., N регистрировались во время и после вспышки. Вычитание производилось с учетом дифференциального вращения Солнца: в системе сферических координат определялось смещение каждого пикселя за время, прошедшее после получения нулевого изображения, а затем производилась интерполяция кадра на момент $t = 0$. Целью построения разностных изображений был поиск диммингов — коронального потемнения, как правило, свидетельствующего об уходе части вещества с выбросом массы (Харра и др., 2007). Такой метод позволяет устанавливать факт эрупции коронального вещества даже в тех случаях, когда выброс непосредственно не наблюдается.

Область димминга и ее границы определялись следующим образом. Мы строили распределение пикселей по яркости, максимум которого (самое

частое значение) принимался за фоновое значение. Затем рассчитывалось среднеквадратичное отклонение сигнала σ . Пиксели, яркость которых лежала в диапазоне $I \pm 3\sigma$, считались относящимися к спокойной короне; пиксели с яркостью $I < 3\sigma$ — к области димминга; пиксели с $I > 3\sigma$ — к эмиссионным ядрам вспышки.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для каждой из трех микровспышек мы получили и представили в работе следующие результаты: 1) изображения высокотемпературного источника излучения в линии MgXII λ 8.42 Å (данные спектрогелиометра MISH); 2) разностные изображения области вспышки (данные прибора FET в линии FeIX λ 171 Å); 3) временной профиль потока излучения вспышки в линии MgXII λ 8.42 Å; 4) временной профиль потока излучения в линии FeIX λ 171 Å, проинтегрированный по области димминга; 5) поток мягкого рентгеновского излучения вспышки в области длин волн 1–8 Å (данные спектрофотометра SphinX).

Микровспышка 19 апреля 2009 г.

Высокотемпературный источник излучения был зарегистрирован спектрогелиометром MISH 19 апреля 2009 г. на двух последовательных кадрах (в 02 : 02 : 54 UT и 02 : 31 : 34 UT) в северо-восточной части солнечного диска (рис. 1, верхняя часть рисунка). На двух предшествующих (00 : 55 : 51 UT и 01 : 32 : 54 UT) и двух последующих (03 : 08 : 37 UT и 03 : 38 : 37 UT) изображениях горячая плазма не наблюдалась. На фотосферных изображениях Солнца данный участок никак не был выделен (отсутствовали пятна и флоккулы), по этой причине соответствующая активная область отсутствовала в каталоге NOAA. На изображениях короны в линии FeIX λ 171 Å в области вспышки наблюдалась структура мелкомасштабных петель с размерами менее 10 тыс. км, которая сформировалась примерно за 2 дня до микровспышки.

Временной профиль мягкого рентгеновского излучения Солнца в диапазоне 1–8 Å, построенный по данным спектрофотометра SphinX, показан на рис. 2в. В соответствии с этими данными формирование горячей плазмы было связано с микровспышкой очень низкой интенсивности, максимум которой зарегистрирован около 02 : 10 UT. По потоку излучения в максимуме рентгеновский класс события оценен нами как A0.38. Вспышка имела фазу роста продолжительностью около 10 мин и длительную фазу спада, продолжавшуюся около

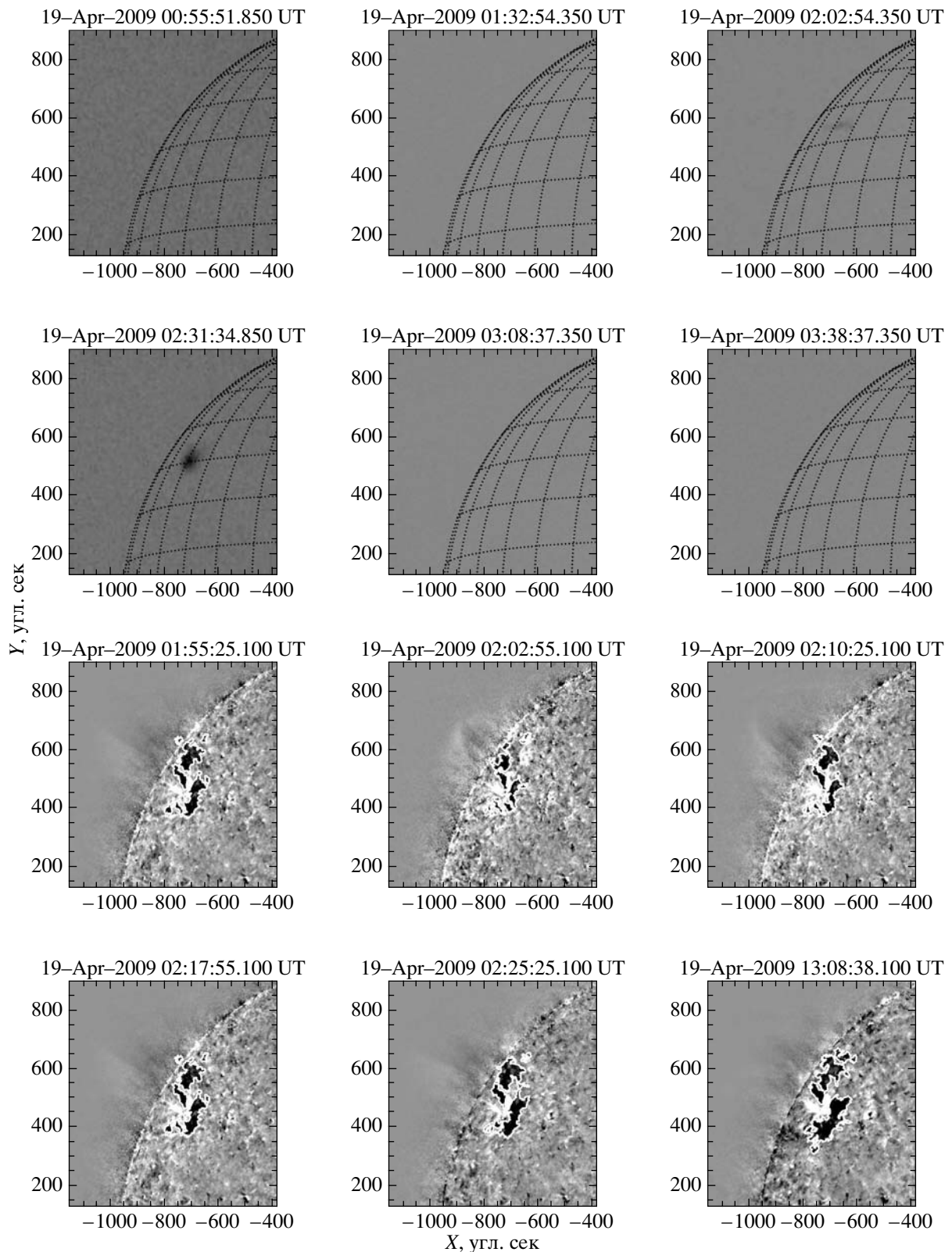


Рис. 1. Микровспышка рентгеновского класса A0.38 от 19.04.2009 г. Вверху — изображения высокотемпературного источника излучения в линии MgXII λ 8.42 Å, полученные спектрогелиометром MISH в составе научной аппаратуры ТЕСИС (КОРОНАС-Фотон). Внизу — разностные изображения короны Солнца в линии FeIX λ 171 Å, построенные по данным телескопа FET в составе ТЕСИС. Черные участки на разностных изображениях — области димминга.

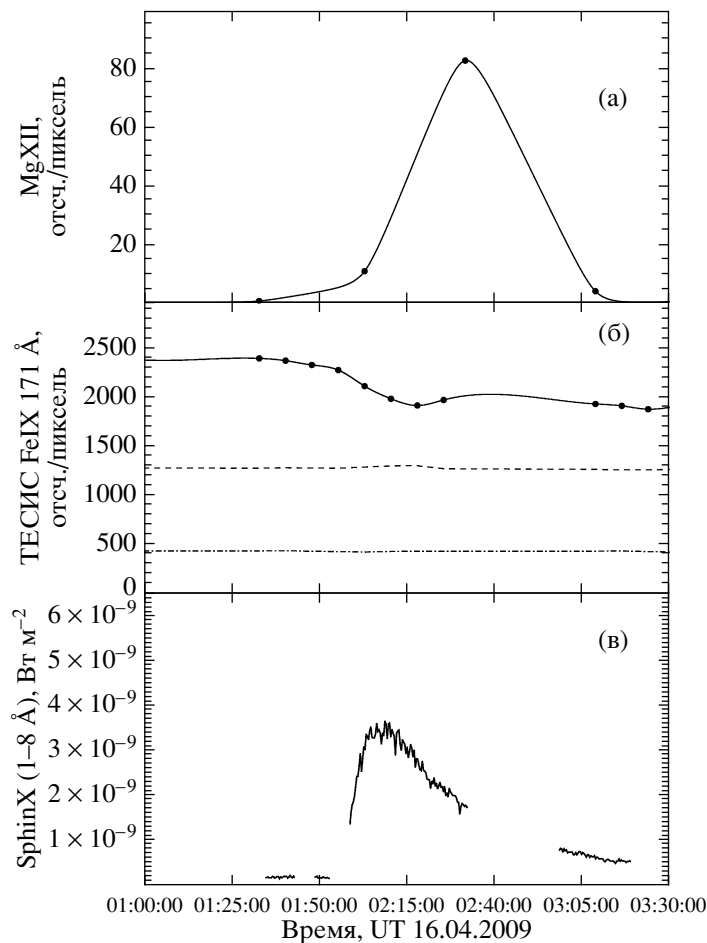


Рис. 2. Временные профили излучения для микровспышки от 19.04.2009 г. (а) — Интегральный поток излучения вспышки в линии MgXII λ 8.42 Å. Результаты измерения показаны точками, а огибающая кривая представляет собой полиномиальное приближение для профиля излучения. (б) — Интегральный поток излучения в линии FeIX λ 171 Å, просуммированный по области димминга и нормированный на один пиксель. Пунктирная и штрихпунктирная линии соответствуют одновременному потоку излучения для спокойной короны и корональной дыры, измеренным в произвольно выбранных точках. (в) — Временной профиль излучения микровспышки в диапазоне 1–8 Å по данным спектрофотометра SphinX в составе ТЕСИС.

2 ч. В приложении к большим вспышкам события с таким профилем относятся к так называемому LDE-типу¹, который часто сопровождается корональными выбросами массы.

Первый кадр с горячей плазмой по данным спектрогелиометра MISH был получен на фазе роста вспышки, за 8 мин до ее максимума. Второй кадр был зарегистрирован уже на фазе спада вспышки, через 21 мин после ее максимума. Интенсивность излучения высокотемпературной компоненты достигла максимума на фазе спада вспышки, т.е. на втором кадре (рис. 2а).

¹ Long Decay Event — события с длительной фазой спада.

На рис. 1в показана серия разностных изображений в линии FeIX λ 171 Å. В соответствии с ними в области микровспышки наблюдалось потемнение короны (димминг), свидетельствующее об уходе части вещества с выбросом массы. Временной профиль излучения из области димминга показан на рис. 2б. Для сравнения на этом же графике показаны профили интегрального излучения из случайно выбранного участка спокойной короны (пунктирная линия) и из участка полярной корональной дыры (штрихпунктирная линия). В соответствии с этим графиком начало формирования димминга примерно совпадает с началом микровспышки, а наиболее глубокий провал его интенсивности достигается вблизи максимума вспышки. Формиро-

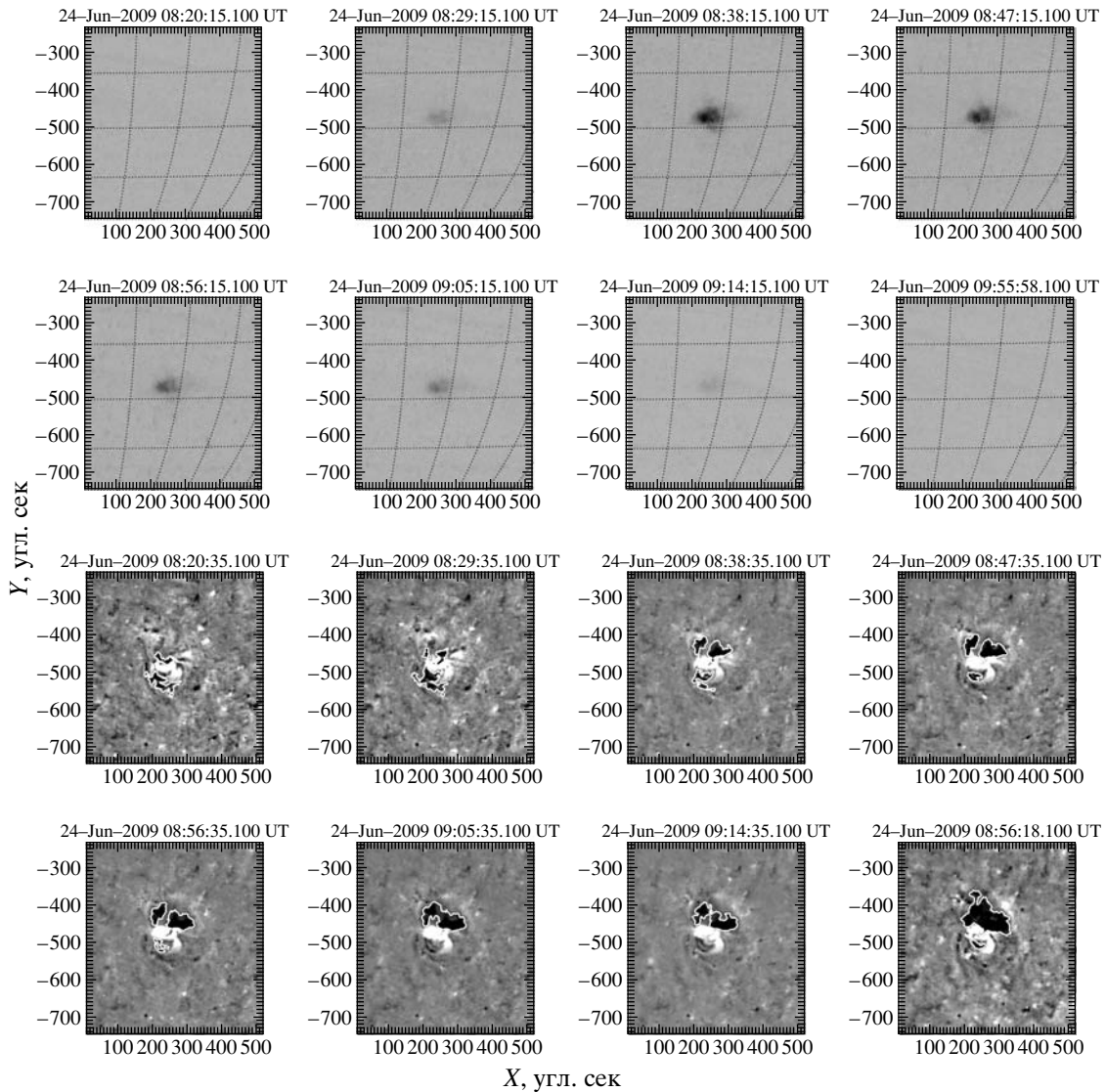


Рис. 3. То же, что на рис. 1, но для микровспышки рентгеновского класса A0.47 от 24.06.2009 г.

вание основного объема горячей плазмы происходит на поздней фазе димминга, временной профиль которой имеет вид плато.

Микровспышка 24 июня 2009 г.

Второй высокотемпературный источник излучения, исследуемый в рамках настоящей работы, был зарегистрирован 24 июня 2009 г. между 08 : 29 UT и 09 : 14 UT в южном полушарии Солнца. Соответствующая активная область имела в каталоге NOAA номер 11022 и существовала около 6 дней. Максимальное число пятен в области составило 2, максимальная площадь пятен — 20 миллионных долей солнечной полусферы.

Горячая плазма по данным спектрогелиометра MISH была обнаружена на шести кадрах, с 08 : 29 : 15 UT по 09 : 14 : 15 UT (рис. 3, верхняя часть рисунка), и наблюдалась с довольно высоким временным разрешением — около 9–10 мин. Момент формирования высокотемпературного источника излучения определяется для данной вспышки весьма точно, поскольку на изображении, полученном за 9 мин до этого (08 : 20 : 15 UT), высокотемпературный источник излучения отсутствует.

По данным спектрофотометра SphinX (рис. 4в), формирование горячей плазмы совпало с микровспышкой рентгеновского класса A0.47. Максимум вспышки зарегистрирован в 08 : 40 UT, продолжительность события немногим более одного

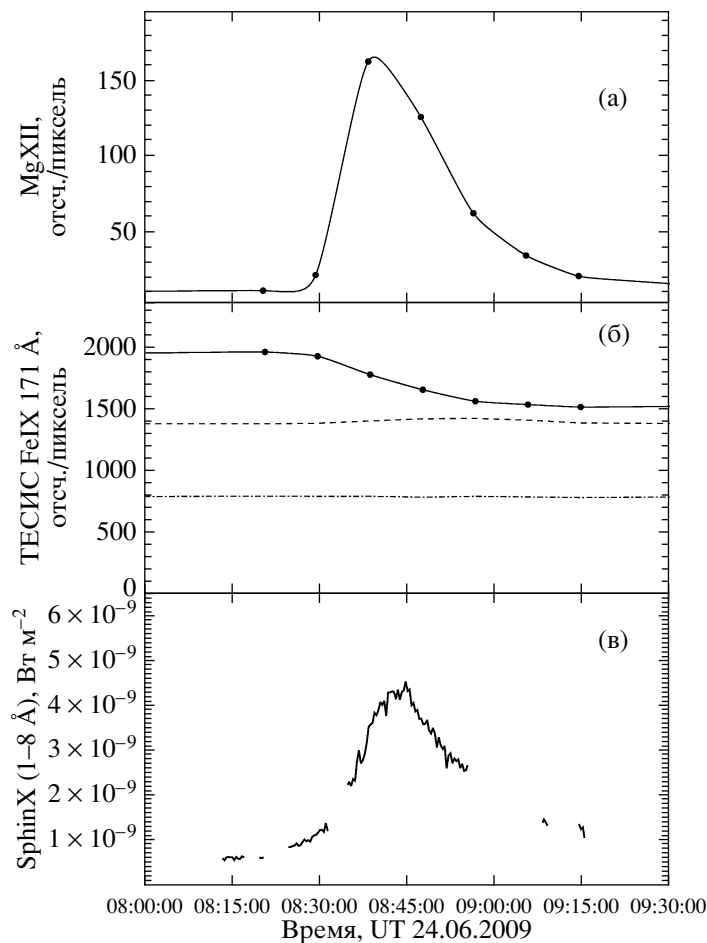


Рис. 4. То же, что на рис. 2, но для микровспышки рентгеновского класса A0.47 от 24.06.2009 г.

часа, а фазы роста и спада микровспышки практически одинаковы и составляют 30 и 40 мин соответственно. Как и во вспышке от 19.04.2009 первый кадр с горячей плазмой зарегистрирован на фазе роста вспышки — примерно за 10 мин до ее максимума. Интенсивность излучения горячей плазмы достигает максимума за 2–3 мин до максимума вспышки (следующее изображение со спектрогелиометра MISH). Все последующие изображения зарегистрированы на фазе спада вспышки. Интенсивность излучения в линии MgXII λ 8.42 Å на этих кадрах монотонно уменьшается до исходного уровня (рис. 4а). В целом, горячая плазма в данном событии регистрируется в течение почти 45 мин, в том числе не менее 25 мин после максимума вспышки.

В нижней части рис. 3 показаны разностные изображения вспышки в линии FeIX λ 171 Å. Примерно одновременно с началом вспышки наблюдается формирование димминга, профиль излучения которого показан на рис. 4б. Профиль димминга

является относительно монотонным — длительная фаза уменьшения яркости короны продолжается около часа с последующим выходом профиля излучения на плато. На этом уровне димминг находился в течение еще нескольких часов после вспышки.

Микровспышка 18 июля 2009 г.

Горячая плазма была обнаружена 18 июля 2009 г. с 01 : 39 UT по 03 : 09 UT в короне над северо-западным лимбом Солнца. Соответствующая активная область сформировалась за три дня до этого, 15 июля 2009 г. Всего по данным прибора MISH было зарегистрировано семь кадров с высокотемпературным источником излучения с временным разрешением около 15 мин (рис. 5, верхняя часть рисунка).

Профиль мягкого рентгеновского излучения вспышки по данным спектрофотометра SphinX показан на рис. 6в. По этим данным формирование горячей плазмы связано с микровспышкой

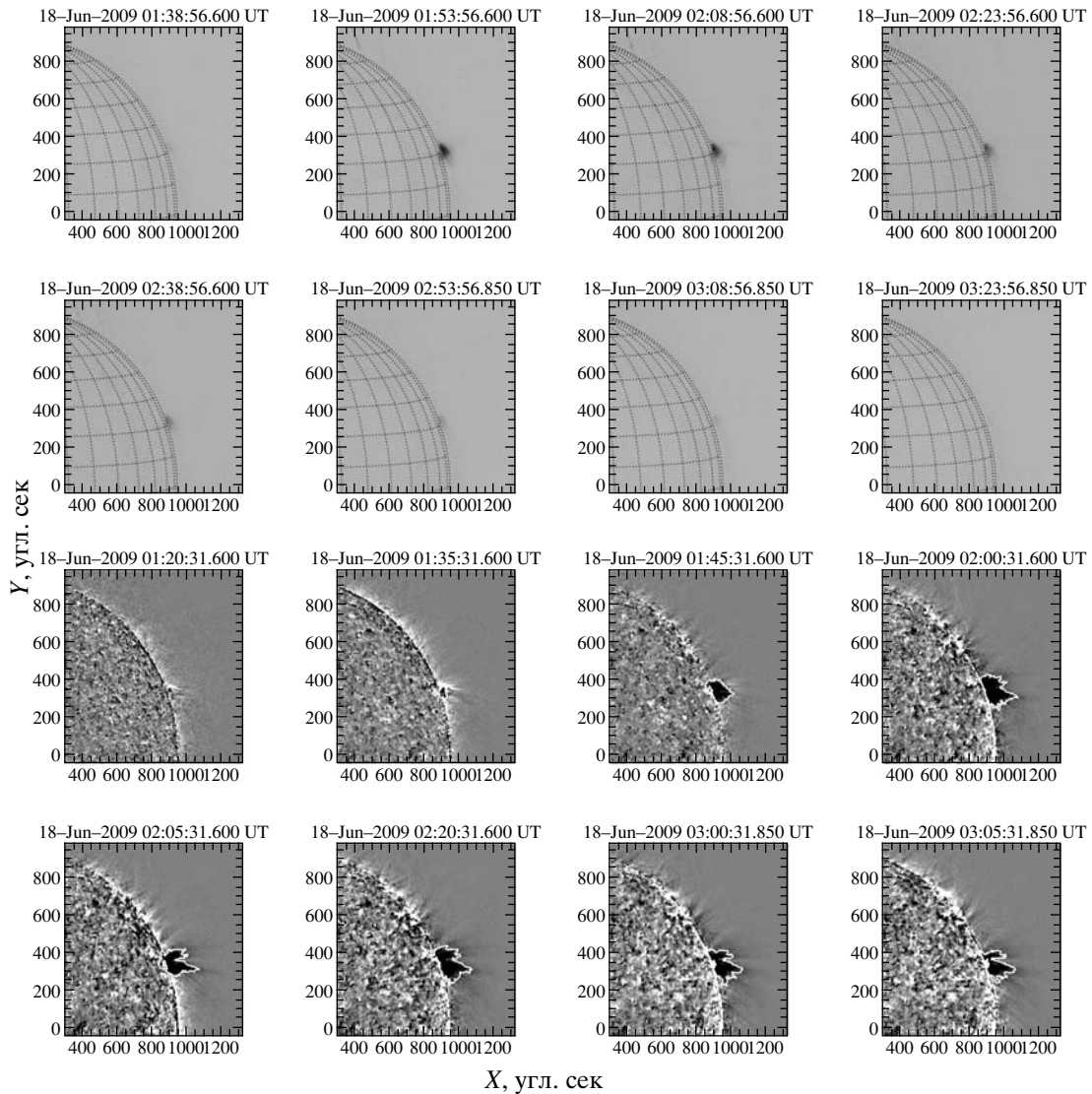


Рис. 5. То же, что на рис. 1, но для микровспышки рентгенового класса A2.2 от 18.07.2009 г.

рентгенового класса A2.2. Максимум вспышки зарегистрирован около 02 : 00; продолжительность составляет около 3 ч. Временной профиль данной вспышки характеризуется достаточно продолжительной фазой роста, составляющей 35 мин, и очень длительной фазой спада — более 1 ч. Первое изображение с признаками существования горячей плазмы было получено в 01 : 38 : 56 UT, что почти точно совпадает с началом вспышки (рис. 6а). Следующий кадр зарегистрирован за 6 минут до максимума вспышки (01 : 53 : 56 UT); в этот момент интенсивность излучения горячей плазмы достигла максимума. На последующих кадрах интенсивность излучения в линии MgXII λ 8.42 Å монотонно падает до исходного уровня.

Серия разностных изображений вспышки показана в нижней части рис. 5. В соответствии с ними данная вспышка, как и предыдущие, сопровождалась эрупцией вещества, начинающейся почти одновременно с началом вспышки. Наиболее глубокое падение яркости в области димминга достигается вблизи максимума вспышки. В дальнейшем временной профиль излучения из области димминга выходит на плато, а после окончания вспышки примерно возвращается к уровню, который оно имело до вспышки.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В работе проведен анализ трех слабых микровспышек рентгенового класса порядка A1.0

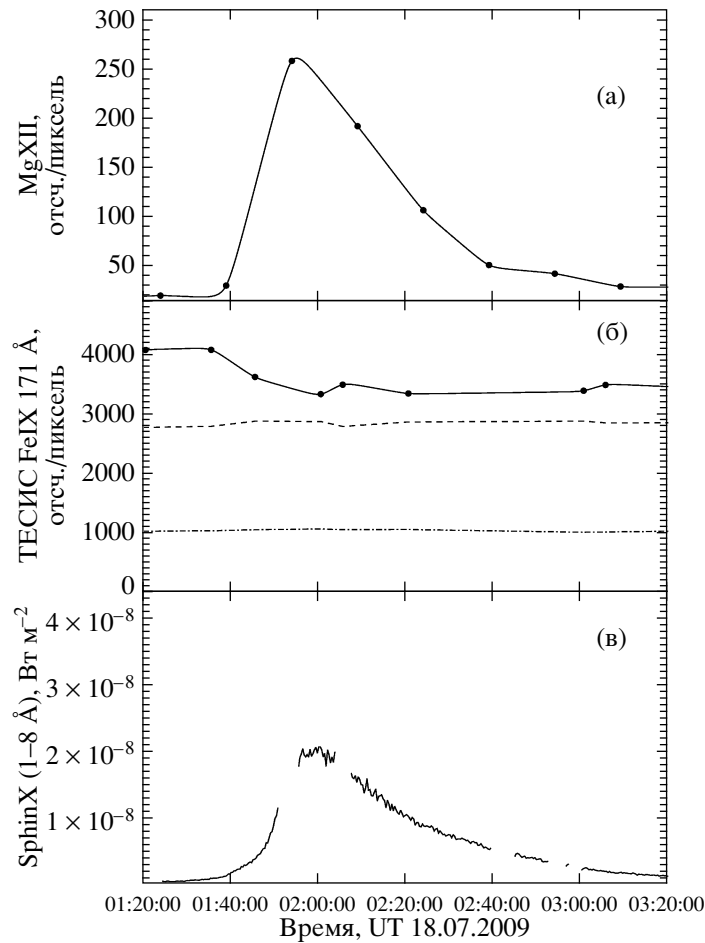


Рис. 6. То же, что на рис. 2, но для микровспышки рентгеновского класса A2.2 от 18.07.2009 г.

и ниже, особенностью которых было длительное энерговыделение, наблюдавшееся в течение десятков минут после максимума вспышки. Для всех трех событий нами были подобраны и проанализированы следующие экспериментальные данные: 1) потоки рентгеновского излучения в диапазоне $1-8 \text{ \AA}$, измеренные по данным прибора SphinX на спутнике КОРОНАС–Фотон; 2) изображения полного диска Солнца, полученные спектрогелиометром MISH в составе аппаратуры ТЕСИС на спутнике КОРОНАС/Фотон; 3) изображения полного диска Солнца в линии 171 \AA , полученные телескопом FET в составе ТЕСИС.

Наблюдения показывают, что все три события имели схожие временные профили с продолжительной фазой спада излучения — десятки минут и более. Данный класс вспышек противоположен так называемым импульсным вспышкам с быстрыми фазами роста и спада. Увеличение продолжительности фазы спада излучения в некоторых

вспышках по сравнению с импульсными событиями объясняется длительным существованием в них высокотемпературной плазмы, для которого, как будет показано ниже, необходимо дополнительное энерговыделение.

Если для больших вспышек регистрация и исследование высокотемпературных источников излучения обычно не представляют проблем, в микровспышках трудности возникают уже на стадии установления факта наличия горячей плазмы. В настоящей работе с этой целью были привлечены изображения с прибора MISH, особенностью которого является высокий порог температурной чувствительности: источники излучения на изображениях формируются при температуре плазмы не менее 4 MK . Благодаря этому мы полагаем, что наличие горячей компоненты во всех трех микровспышках установлено достаточно достоверно, и концентрируем внимание на другом факте: во всех трех событиях горячая плазма наблюдалась в течение десятков минут после максимума вспышки,

Основные характеристики исследованных микровспышек

Дата	19.04.2009	24.06.2009	18.07.2009
Объем, 10^{27} см^3	4–52	5–52	12–84
Электронная температура T_e , МК	5.3	6.3	7.4
Концентрация электронов N_e , 10^9 см^{-3}	0.6 ± 0.3	1 ± 0.5	2 ± 1
Тепловая энергия, E_T , 10^{28} эрг	4.1 ± 1.9	4.2 ± 2.2	9.6 ± 5.2
Мера эмиссии, 10^{46} см^{-3}	0.9	1.2	4.6
Расчетное время охлаждения источника	30 ± 5 с	40 ± 10 с	80 ± 15 с
Фактическое время охлаждения источника	22–59 мин	34–76 мин	69–84 мин

что заметно превышает ожидаемые времена теплопроводного и лучистого охлаждения.

Расчет времен охлаждения может быть произведен исходя из оценок температуры и концентрации плазмы, а также размеров объекта. Объем высокотемпературного источника в целом довольно точно определяется по его видимому изображению в линии $\text{MgXII } \lambda 8.42 \text{ \AA}$. При этом необходимо учитывать особенности прибора, состоящие в том, что из-за используемой оптической схемы видимые размеры источника на изображении всегда несколько увеличены в направлении дисперсии кристаллического зеркала инструмента. Результаты расчетов (объем источника излучения в см^3) приведены в таблице. Неопределенность в значении объема связана с наличием дисперсии изображения, а также с неточностью в определении поперечного размера источника. Температура плазмы определялась нами в изотермическом приближении путем сравнения временных профилей излучения в диапазоне $1\text{--}8 \text{ \AA}$, измеряемых одновременно GOES и SphinX. Концентрация плазмы оценивалась исходя из меры эмиссии источника излучения в линии $\text{MgXII } \lambda 8.42 \text{ \AA}$, определявшейся как отношение мощности излучения в данной линии к светимости при рассчитанной температуре. Поскольку при таком способе определения концентрации одной из переменных является объем источника, то неточности в определении объема приводят к неопределенности в концентрации, что также отражено в таблице.

Наиболее эффективным способом охлаждения плазмы в областях температуры $5\text{--}10$ МК и концентрации $10^8\text{--}10^9 \text{ см}^{-3}$ является теплопроводность вдоль силовых линий магнитного поля. Темп потери энергии для охлаждения единичного объема

плазмы за счет теплопроводности может быть рассчитан по формуле (Ашванден, 2004)

$$P_{\text{cond}} = \frac{d}{dt} [3n_e(t)k_B T(t)] \approx -\frac{2}{7}\kappa \frac{T(t)^{7/2}}{L^2}, \quad (1)$$

где k_B — постоянная Больцмана, κ — спитцеровская теплопроводность, равная $9.2 \times 10^{-7} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-1} \text{ К}^{-7/2}$, T — температура, L — характерный линейный размер горячей области.

В случае остывания за счет излучения

$$P_{\text{rad}} = \frac{d}{dt} [3n_e(t)k_B T(t)] \approx -n_e(t)^2 \Lambda_0 T(t)^{-2/3}, \quad (2)$$

где n_e — электронная концентрация, $\Lambda_0 = 10^{-17.73}$ — коэффициент функции радиационных потерь (Рознер, 1978). Отношение эффективностей этих двух механизмов составляет

$$\frac{P_{\text{cond}}}{P_{\text{rad}}} \sim 10^3, \quad (3)$$

т.е. скорость потери энергии на охлаждение за счет теплопроводности превышает скорость потери энергии на охлаждение излучением на три порядка.

В качестве фактического времени охлаждения высокотемпературного источника излучения мы использовали интервал времени между максимумом вспышки (т.е. окончанием ее импульсной фазы) и временем последней регистрации источника излучения в линии MgXII спектрогелиометром MISH. Данное время, фактически, является нижней оценкой: источник не мог существовать меньше времени, чем мы его фактически наблюдали, но мог существовать и больше. При этом, поскольку временное разрешение наблюдений MISH в этот период лежало в диапазоне от 5 до 20 мин,

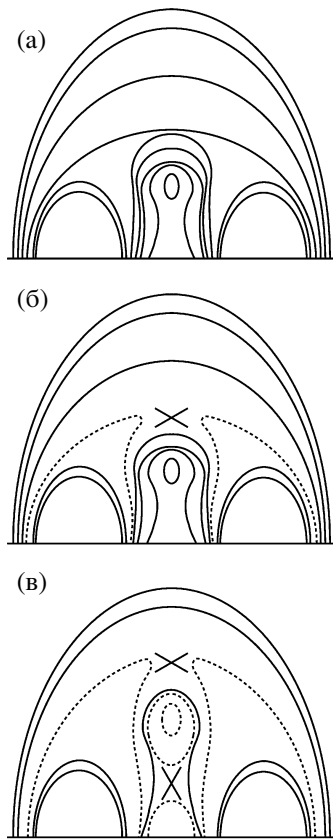


Рис. 7. Схема процесса пересоединения во время эруптивного процесса для квадрупольной конфигурации поля. Крестом указаны места пересоединения. Непрерывные линии соответствуют линиям поля, не участвующим в пересоединении. Пунктирные линии — нагретые в результате пересоединения линии поля.

верхняя оценка времени охлаждения не может превосходить нижнюю больше чем на 20 мин.

Теоретическое время охлаждения плазмы рассчитывалось как время уменьшения ее температуры с начального значения из таблицы до температуры 4 МК, являющейся нижней границей температурной чувствительности прибора MISH. Мы применяли следующую формулу:

$$T(t) = T_1 \left[1 - \frac{t - t_1}{\tau_{\text{cond}}} \right]^{-2/5}, \quad (4)$$

откуда получаем

$$\tau_{\text{cond}} = \frac{21 \langle n_e \rangle k_B L^2}{5 \kappa T_1^{5/2}}. \quad (5)$$

Результаты расчетов приведены в таблице.

Из сравнения фактического времени жизни источника с темпом его теплопроводного охлаждения можно определить полную энергию, которая была

‘вложена’ в источник для поддержания его существования. Для вспышек от 19 апреля, 24 июня и 18 июля 2009 года эта величина составляла соответственно $(8.0 \pm 3.5) \times 10^{29}$ эрг, $(2.4 \pm 0.7) \times 10^{30}$ эрг и $(3.6 \pm 0.5) \times 10^{30}$ эрг. При этом на первоначальное формирование источников излучения наблюдаемых температур требуется затратить от 2.1×10^{28} до 1.5×10^{29} эрг. Таким образом, баланс энергии во всех исследованных микровспышках был не вполне обычным. Непосредственно в момент вспышки было высвобождено только около 5–10% от полной тепловой энергии, а оставшиеся 90–95% поступили в область уже после окончания импульсной фазы события в течение нескольких десятков минут. Не исключено, что такой особенностью обладают все микровспышки, в которых регистрируются большие объемы высокотемпературной плазмы.

Возможность поддержания длительного энерговыделения на поздних стадиях вспышек за счет эрупций в целом не противоречит данным, известным из физики больших вспышек. Достаточно широко распространена точка зрения, что выбросами сопровождаются все (или почти все) вспышки, в которых наблюдается длительная фаза спада излучения (Шили и др., 1983; Кай и др., 2003). В качестве механизма энерговыделения при этом рассматривается магнитное пересоединение, связанное с перестройкой магнитной конфигурации при всплывании плазмоида. В качестве примера можно рассмотреть случай, описанный в работе Мур и др. (2011) и показанный на рис. 7. Данная схема магнитного пересоединения соответствует развитию эрупции в квадрупольной магнитной конфигурации. На рис. 7а схематически изображена первоначальная магнитная конфигурация со сформировавшимся плазмоидом. На рис. 7б показано начало процесса пересоединения, связанное с всплыванием плазмоида. Крестом указано место пересоединения, а пунктирная линия соответствует линии поля, участвующей в процессе пересоединения. На рис. 7в демонстрируются последствия дальнейшего всплывания плазмоида. Плазмодид не только разрывает линии, находящиеся сверху, но и отрывается от линий поля, удерживавших его снизу. Крестами указаны две области пересоединения, одна из которых (более компактная) расположена в нижней короне и может соответствовать яркому высокотемпературному источнику излучения, наблюдавшемуся в исследованных микровспышках. Верхняя область пересоединения не наблюдается в области высоких температур (возможно потому, что высвобождаемая здесь энергия распределяется по гораздо большему объему). Сплошные линии на рисунке соответствуют линиям поля, не участвующим в пересоединении, пунктирные линии —

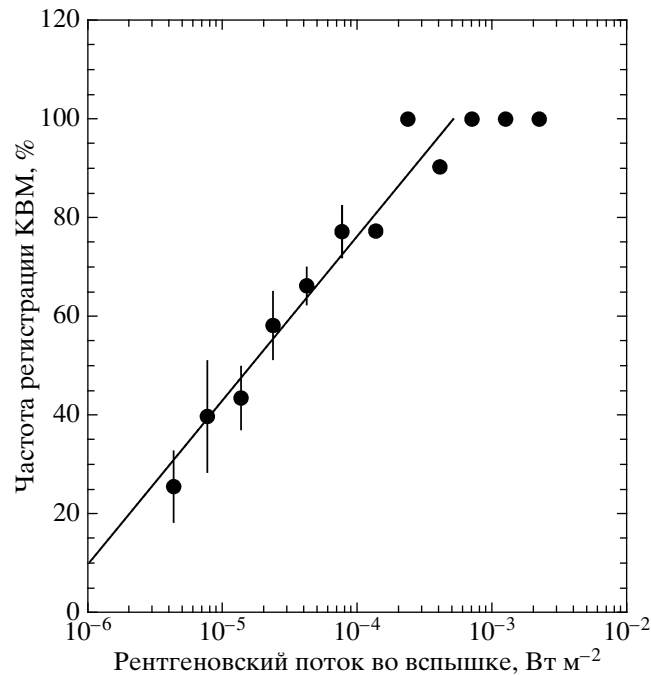


Рис. 8. Зависимость вероятности регистрации КВМ во вспышке в зависимости от ее рентгеновского класса.

нагретым в результате пересоединения линиям поля. Определенной альтернативой данному механизму может быть энерговыделение, возникающее в скрученных магнитных конфигурациях при достижении в них критической величины электрического тока. Согласно расчетам, энерговыделение в этом случае может продолжаться до нескольких часов (Соловьев, 2012).

В заключение отметим, что корональные выбросы массы (КВМ) обычно считаются атрибутом достаточно мощных вспышек. Так, Яширо и др. (2006) продемонстрировали наличие зависимости между мощностью вспышки и вероятностью возникновения сопутствующего КВМ и показали, что во вспышках высоких рентгеновских классов КВМ наблюдается практически всегда (рис. 8). В то же время согласно полученной зависимости во вспышках, рентгеновский класс которых находится ниже уровня В5 по классификации GOES, КВМ не должно быть. В настоящей работе мы показали, что, хотя прямые наблюдения КВМ в исследованных событиях отсутствуют, в них наблюдается эрупция плазмы, которую мы считаем косвенным признаком выброса. Яширо и др. (2006) также сделали вывод, что отсутствие КВМ в слабых вспышках может быть связано с недостаточной чувствительностью современных коронографов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 11-02-01079), программы № 22

фундаментальных исследований Президиума РАН (секция 2 “Солнце и гелиосфера”) и гранта eHEROES 7-й Рамочной программы Европейской комиссии (2007–2013 гг., проект № 284461, www.eheroes.eu).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ашванден, (M.J. Aschwanden), Physics of the Solar Corona. An Introduction (Chichester, UK: Praxis Publ., 2004).
2. Ашванден и др. (M.J. Aschwanden, A. Winebarger, D. Tsiklauri, et al.), Astrophys. J. **659**, 1673 (2007).
3. Брозюс, Холман (J. W. Brosius and G. D. Holman), Astrophys. J. **692**, 492 (2009).
4. Йокояма, Шибата (T. Yokoyama and K. Shibata), Nature **375**, 42 (1995).
5. Кай и др. (H.R.M. Kay, L.K. Harra, S.A. Matthews, et al.), Astron. Astrophys. **400**, 779 (2003).
6. Крист и др. (S. Christe, I.G. Hannah, S. Krucker, et al.), Astrophys. J. **677**, 1385 (2008).
7. Лин и др. (R.P. Lin, R.A. Schwartz, S.R. Kane, et al.), Astrophys. J. **283**, 421 (1984).
8. Миллиган (R.O. Milligan), Astrophys. J. **680**, L157 (2008).
9. Мур и др. (R.L. Moore, A.C. Sterling, G.A. Gary, et al.), Space Sci. Rev. **160**, 73 (2011).
10. Нерейн, Ульмшнейдер (U. Narain and P. Ulmschneider), Space Sci. Rev. **54**, 377 (1990).
11. Рознер и др. (R. Rosner, W.H. Tucker, and G.S. Viana), Astrophys. J. **220**, 643 (1978).

12. Смит, Смит (H.J. Smith and E.V.P. Smith), *Solar Flares* (New York: Macmillan, 1963).
13. Соловьев (A.A. Solov'ev), *Geomagnetism and Аероному* **52**, 1062 (2012).
14. Ханна и др. (I.G. Hannah, S. Christe, S. Krucker, et al.), *Astrophys. J.* **677**, 704 (2008).
15. Харра и др. (L.K. Harra, H. Hara, S. Imada, et al.), *Publ. Astron. Soc. Japan* **59**, 801 (2007).
16. Цунета и др. (S. Tsuneta, S. Masuda, T. Kosugi, et al.), *Astrophys. J.* **478**, 787 (1997).
17. Чен, Динг (F. Chen and M.D. Ding), *Astrophys. J.* **724**, 640 (2010).
18. Шаде и др. (A. Schadee, C. de Jager, and Z. Svestka), *Solar Phys.* **89**, 287 (1983).
19. Шили и др. (N.R. Sheeley, Jr., R.A. Howard, M.J. Koomeen, et al.), *Astrophys. J.* **272**, 349 (1983).
20. Яширо и др., (S. Yashiro, S. Akiyama, N. Gopalswamy, et al.), *Astrophys. J.* **650**, L143 (2006), arXiv:astro-ph/0609197.

Сдано в набор 08.07.2013 г.	Подписано к печати 05.09.2013 г.	Дата выхода в свет 20 еж.	Формат 60 × 88 ¹ /8
Цифровая печать	Усл. печ. л. 10.0	Усл. кр.-отт. 0.9 тыс.	Уч.-изд. л. 10.1
Тираж 84 экз.	Зак. 1756	Цена свободная	

Учредители: Российская академия наук, Институт космических исследований РАН

Издатель: Российская академия наук. Издательство "Наука", 117997 Москва, Профсоюзная ул., 90

Оригинал-макет подготовлен МАИК "Наука/Интерпериодика"

Отпечатано в ППП «Типография "Наука"», 121099 Москва, Шубинский пер., 6