

УДК 523.98

СОЛНЕЧНЫЕ ВСПЫШЕЧНЫЕ ЭРУПЦИИ С ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКРАНИРОВКОЙ ИЗЛУЧЕНИЯ В ЛИНИИ HeII 304 Å И В МИКРОВОЛНОВОМ ДИАПАЗОНЕ

© 2011 г. В. В. Гречнев¹, И. В. Кузьменко², И. М. Черток³, А. М. Уралов¹

¹ Учреждение Российской академии наук Институт солнечно-земной физики
Сибирского отделения РАН, Иркутск, Россия

² Учреждение Российской академии наук Уссурийская астрофизическая обсерватория
Дальневосточного отделения РАН, Уссурийск, Россия

³ Учреждение Российской академии наук Институт земного магнетизма,
ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова, Троицк Моск. обл., Россия

Поступила в редакцию 17.11.2010 г.; принята в печать 13.01.2011 г.

Извергнутая при солнечных эрупциях плазма с температурами, близкими к хромосферным, может экранировать часть излучения как компактных источников в активных областях, так и областей спокойного Солнца. Явления поглощения могут наблюдаться в микроволновом диапазоне в виде так называемых “отрицательных всплесков”, а также в линии HeII 304 Å. Рассмотрены три эруптивных события, связанных с довольно мощными вспышками. По записям потока “отрицательного всплеска” на нескольких радиочастотах для одного из рассмотренных событий оценены параметры поглощавшего излучение вещества выброса. В единичных событиях обнаружено “разрушение” эруптивного волокна и его распыление в виде облака по огромной поверхности, наблюдаемое в виде грандиозных депрессий излучения в линии HeII 304 Å. Одно из трех известных нам таких событий рассматривается в данной статье, еще одно из рассмотренных — возможный кандидат.

1. ВВЕДЕНИЕ

Во многих солнечных эруптивных событиях протуберанцы (волокна) извергаются и уносятся от Солнца в составе корональных выбросов (КВМ). Нередко наблюдается частичное стекание плазмы из эруптивного протуберанца вдоль его оснований вниз к солнечной поверхности. Известны и “неудавшиеся” эрупции: взлетевший протуберанец (волокно) быстро теряет скорость и возвращается примерно к тому же месту, где он располагался до эрупции [1]. Наблюдения эруптивного события 18.11.2003 телескопом КОРОНАС-Ф/СПИРИТ в линии HeII 304 Å выявили еще один сценарий: эруптивное волокно разделилось на части в виде Y-образного облака, пролетело над солнечной поверхностью расстояние свыше солнечного радиуса и, вероятно, осело на поверхность вдали от места эрупции [2, 3]. Аналогичная аномальная эрупция наблюдалась в событии 13.07.2004 [4], детальные наблюдения которого позволили выявить эрупцию компактного волокна из активной области с последующим рассеиванием его фрагментов по огромной поверхности, сопоставимой с четвертью видимого солнечного диска. Эти события сопровождалась импульсными вспышками.

Связанные со вспышками эруптивные события порождают разнообразные явления разных временных и пространственных масштабов, наблюдаемые в различных областях спектра [5]. Это — вспышечные аркады, излучение которых регистрируется от рентгеновского до радиодиапазона. Это — депрессии мягкого рентгеновского и крайнего ультрафиолетового излучения (димминги), достигающие значительных размеров, и наблюдающиеся от нескольких часов до 2 сут. Главной причиной квазистационарных диммингов является снижение концентрации плазмы вследствие расширения эруптивных структур. Ударные волны, возбуждаемые в импульсных эрупциях из активных областей, проявляются как волны Мортон и некоторые “волны EUV” (“волны EIT”). Их распространение прослеживается по медленно дрейфующим всплескам II типа на метровых и дециметровых волнах. Скорее всего, ударными волнами формируются передние края быстрых КВМ, особенно замедляющихся [6].

Извергнутая при эрупциях плазма с температурами, близкими к хромосферным, может экранировать часть солнечного излучения, поглощая его заметную долю. Явления поглощения обнару-

живаются в различных диапазонах излучения. В линии $H\alpha$ извергнутая плазма наблюдается преимущественно в виде сердечей, размеры которых обычно невелики. В отдельных случаях движущиеся сгустки могут наблюдаться и на значительных расстояниях от места эрупции [4]. Возможности наблюдений продуктов эрупции в линии $H\alpha$ ограничены доплеровским смещением, приводящим к их выходу за пределы полосы фильтра даже при небольших лучевых скоростях, и другими причинами, вызывающими быструю потерю ими оптической толщины при расширении. Явления поглощения могут наблюдаться и в радиодиапазоне в виде так называемых “отрицательных всплесков” — временного понижения интегрального потока радиоизлучения ниже квазистационарного уровня вне всплесков [7]. В отличие от линии $H\alpha$, в радиодиапазоне, где оптическая толщина волокна пропорциональна квадрату длины волны радиоизлучения, как неподвижные, так и эруптивные волокна могут быть оптически толстыми практически во всем микроволновом диапазоне и вызывать заметные депрессии излучения.

Поглощение фонового солнечного излучения вследствие фотоионизации наблюдается и в крайнем ультрафиолетовом диапазоне: волокна иногда видны как темные образования в корональных эмиссионных линиях $FeIX-X$ 171 Å и $FeXII$ 195 Å (нередко с урчающей во время эрупции оболочкой), а плотные части эруптивных волокон могут проявляться как низкоконтрастные фрагментарные движущиеся димминги. Особенно значительным поглощением может быть в линии $HeII$ 304 Å из-за того, что сечение фотоионизации таким излучением водородно-гелиевой плазмы с температурой, близкой к хромосферной, на порядок выше, чем для линии 195 Å; кроме того, возможно резонансное рассеяние излучения в этой линии плазмой с температурой в несколько десятков тысяч К, характерной для переходной области (как между короной и хромосферой, так и между короной и протуберанцем). Максимум температурной чувствительности канала 304 Å составляет 80 тыс. К. Вследствие этих особенностей, вещество эруптивного волокна, диапазон температур плазмы в котором может быть достаточно широким, может иметь в этом канале и пониженную яркость, и повышенную. Наконец, извергнутая при эрупции плазма может наблюдаться и в линии HeI 10 830 Å, представляющей отклик как на хромосферные, так и на корональные явления. Изложенные обстоятельства показывают, что явления длительного экранирования фонового солнечного излучения могут наблюдаться в линии $HeII$ 304 Å и в радиоизлучении диапазона 1–10 ГГц [8].

В исследовании [8] анализировались эруптивные события, для которых имелись записи отрицательных радиовсплесков на ряде частот. Выполненные по этим данным модельные оценки температуры, массы и размеров поглотителя подтвердили, что им, скорее всего, было вещество эруптивных волокон. Предметом настоящего исследования являются эруптивные события, вслед за которыми наблюдались обширные потемнения в канале 304 Å телескопа SOHO/EIT и “отрицательные” микроволновые всплески. В разделе 2 представлен анализ наблюдений событий в различных спектральных диапазонах, в разделе 3 выполнены оценки параметров поглощающего вещества для одного события, разделы 4 и 5 посвящены обсуждению и обобщению результатов.

2. АНАЛИЗ НАБЛЮДЕНИЙ

Для анализа наблюдений в крайнем ультрафиолетовом диапазоне использовались изображения, полученные телескопом EIT [9] солнечной обсерватории SOHO в каналах 195 Å (типичный интервал между изображениями 12 мин) и 171, 284, 304 Å (обычно — 6 ч). Исходные файлы в формате FITS взяты из каталога EIT (<http://umbra.nascom.nasa.gov/eit/eit-catalog.html>). Использованы записи интегральных потоков радиоизлучения на радиополяриметрах обсерватории Нобеяма (<ftp://solar.nro.nao.ac.jp/pub/norp/xdr/>), радиотелескопе РТ-2 Уссурийской обсерватории (http://www.uafo.ru/observ_rus.php) и станции Лермонт Сети солнечных радиотелескопов RSTN BBC США (ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR_DATA/SOLAR_RADIO/RSTN_1sec/). Данные о KBM приводятся по каталогу “SOHO LASCO CME Catalog” (http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/) [10]. Сводные данные о солнечных событиях взяты в бюллетене “Solar-Geophysical Data” (<http://sgd.ngdc.noaa.gov/sgd/jsp/solarindex.jsp>).

2.1. Событие 1: 29.04.1998

Это событие, связанное со вспышкой 3B/M6.8 (максимум в 16:37; все времена приведены в UT), произошло в активной области NOAA 8210 (S16 E22, $\beta\gamma\delta$ -конфигурация). Различные аспекты этого события рассматривались в ряде статей [11–13]. Судя по наблюдениям в линии $H\alpha$ [11] в обсерватории Биг Бэр (BBSO) и в линиях $H\alpha$ и HeI (см. фильм на сайте http://mlso.hao.ucar.edu/cgi-bin/mlso_datasum.cgi?1998&4&29&ACOS) в обсерватории Мауна Лоа (MLSO); в событии

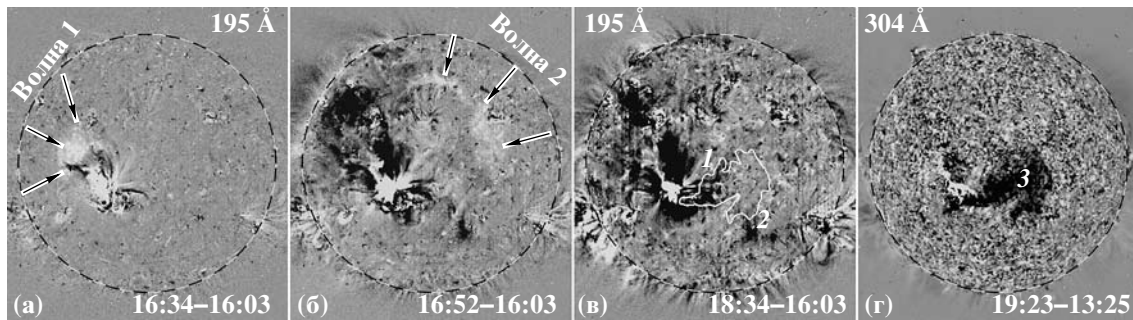


Рис. 1. Разностные изображения Солнца по данным SOHO/EIT для события 29.04.1998: (а–в) — корональные возмущения, наблюдавшиеся EIT в канале 195 Å; (г) — обширное потемнение, наблюдавшееся EIT в канале 304 Å. Контур на изображении (в) воспроизводит потемнение 3 в канале 304 Å (г). Черно-белая штриховая окружность — солнечный лимб.

произошло несколько последовательных эрупций различных волокон или их частей. Развитие вызванных эрупциями возмущений показывают разностные изображения EIT 195 Å и 304 Å на рис. 1а–1г. На всех изображениях солнечное вращение скомпенсировано, и для каждого из каналов 195 Å и 304 Å вычтено изображение, полученное до начала события (методика обработки изложена в [14]). По-видимому, первые эрупции возбуждали как минимум две следовавших одна за другой ударные волны, проявившиеся во всплесках II типа и как волны EUV. Первая из них распространялась в северо-восточном направлении (рис. 1а), вторая — в северо-западном (рис. 1б). В линии H α в 16:32–16:46 наблюдалось движение выброшенного в начале события вещества в направлении NNE через экватор, и наиболее яркий КВМ появился над северо-восточной частью лимба в 16:58. Быстрый гало КВМ (средняя скорость в картинной плоскости 1374 км/с) испытывал значительное замедление. Начиная с 17:25, над юго-западным лимбом наблюдалась противоположная часть коронального транзита, возможно, связанная с ударной волной.

В канале 195 Å зарегистрированы масштабные квазистационарные димминги (рис. 1б, 1в). Три наиболее глубоких димминга почти не менялись в течение 2–3 ч после эрупции. Один из них располагался севернее области эрупции, второй опоясывал ее с юга, третий находился вблизи северо-восточной части лимба. Не очень значительны и различия между диммингами, видимыми в корональных линиях 171, 195 и 284 Å. Однако на единственном за 6 ч изображении в канале 304 Å, полученном в 19:23 (рис. 1г), на запад от области эрупции простирается обширное потемнение 3, не наблюдавшееся в корональных каналах. Его площадь на уровне 25%-снижения яркости достигала 6.5% от площади солнечного диска, максималь-

ная глубина составляла —85% (яркость снизилась до 15% от начального уровня).

Ряд наблюдательных фактов указывает на то, что это потемнение 3 было вызвано затенением солнечного излучения выброшенным при эрупции веществом. На изображениях в канале 195 Å в интервале 18:07–18:53 видно движение узкого протяженного потемнения 1 (рис. 1в) в сторону обширного потемнения 3. Видны и изменения, связанные с движением от области эрупции на юго-запад, в сторону потемнения 2 (ср. рис. 1б, 1в). После 16:52 в линиях H α и HeI обнаружимо медленное движение (не более 100 км/с) в проекции на солнечный диск в направлении NWW. Это движение проявляется на изображениях HeI вплоть до 20:00 на расстоянии от места эрупции, в картинной плоскости почти равном солнечному радиусу.

В микроволновом диапазоне после импульсного всплеска наблюдался “отрицательный” всплеск. Запись обсерватории Пентинктон на частоте 2.8 ГГц (в солнечных единицах потока, 1 с.е.п. = 10^{-22} Вт/м² Гц) представлена на рис. 2. Запись всплеска прерывалась калибровками, занимающими значительную часть наблюдательного времени в этой обсерватории (калибровочные ступени на рисунке вырезаны для наглядности). Понижение интегрального потока радиоизлучения относительно квазистационарного уровня началось не позже 16:56, длилось примерно час, и в максимуме поглощения (17:00–17:20) достигало —11% от уровня до всплеска. В обсерватории Куба на частоте 6.7 ГГц также был зарегистрирован отрицательный радиовсплеск длительностью 53 мин с максимальной депрессией радиоизлучения в 16:40 (Solar-Geophysical Data). Отрицательный всплеск угадывается и на многочастотных записях обсерваторий Сагамор Хилл и Палехуа в диапазоне 0.4–2.7 ГГц, но низкое качество этих записей не дает возможности их количественного анализа

для оценки параметров поглощающего “экрана”. Тем не менее, с учетом данных других диапазонов ясно, что снижение интегрального потока радиозлучения было вызвано не только возможным затенением микроволновых источников в активной области, но и затенением обширных спокойных областей Солнца. Не видно альтернатив продуктам эрупции в качестве затеняющего экрана.

Изложенные наблюдательные факты показывают, что в событии 29.04.1998 за одной или несколькими волоконными эрупциями последовало разрушение магнитной структуры выброса и рассеяние фрагментов по значительной площади над солнечной поверхностью. Результатами вызванного этим затенения фонового солнечного излучения были отрицательный радиовсплеск и долгоживущее крупномасштабное потемнение, видимое в канале 304 \AA и не имевшее явных аналогов в корональных каналах (хотя слабые признаки поглощения в этой области обнаружимы на изображениях 195 \AA). Не исключено, что за образование затенявших экранов, вызвавших отрицательный радиовсплеск и за потемнение в канале 304 \AA , были ответственны одновременные аномальные эрупции. Очевидно, что рост радиопотока в связи с небольшим радиовсплеском, начавшимся в 17:50, должен был прекратить депрессию интегрального потока радиозлучения, которая при отсутствии этого всплеска могла бы продолжаться и дольше. Но более продолжительное существование потемнения в линии 304 \AA по сравнению с отрицательным всплеском (в данном событии — более чем на 1.5–2 ч), по-видимому, является закономерным (см. раздел 4).

2.2. Событие 2: 27/28.05.2003

Два эруптивных события, связанных с мощными вспышками, произошли в активной области NOAA 10365 (S07 W17, $\beta\gamma\delta$ -конфигурация) с интервалом около 90 мин. Первое было связано со вспышкой 2B/X1.3 (максимум 27 мая в 23:07), второе — со вспышкой 1B/X3.6 (максимум 28 мая в 00:27). Оба события наблюдались в линии $\text{H}\alpha$ в обсерватории BBSO (<http://bbso.njit.edu/>) и в линиях $\text{H}\alpha$ и HeI в обсерватории MLSO (см. фильм на сайте http://mlso.hao.ucar.edu/cgi-bin/mlso_datasum.cgi?2003&5&27&ACOS). Судя по изображениям в линии $\text{H}\alpha$, в обоих событиях были возможны волны Мортон. Также в обоих событиях зарегистрированы всплески II типа. Эти обстоятельства указывают на образование в обоих событиях ударных волн, что согласуется и с замедлением первого гало KBM (средняя скорость — 964 км/с). Телескоп SOHO/EIT в это время

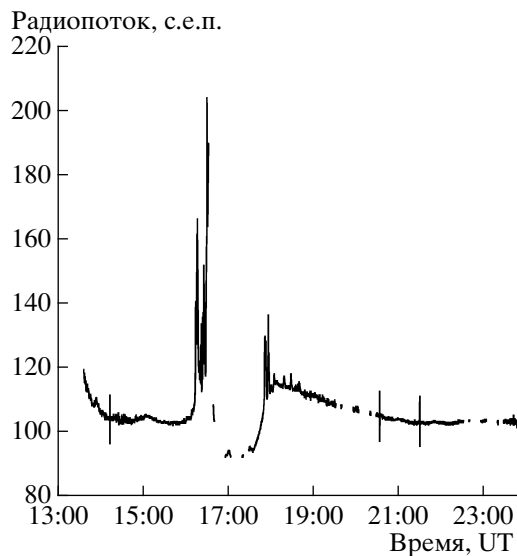


Рис. 2. Запись радиовсплеска на частоте 2.8 ГГц в событии 29.04.1998 в обсерватории Пентиктон, любезно предоставленная К. Тэппингом.

наблюдал в канале 304 \AA с 12-мин интервалом, а изображения во всех четырех каналах снимались, как обычно, 4 раза в сутки.

Явления поглощения наблюдались после первого события. На изображениях в линии $\text{H}\alpha$, полученных в обсерватории BBSO (рис. 3), видна начавшаяся около 23:00 эрупция волокна F1, находившегося в северо-восточной части активной области, и исчезновение располагавшегося южнее волокна F2 (рис. 3б). Двойную эрупцию подтверждает появление вспышечных лент на месте обоих волокон. Выглядевшая как струя северная оконечность распрямлявшегося волокна F1 прослеживается до 23:11. В это же время в южной части активной области возник темный возвратный сердж S, по-видимому, вследствие стекания холодного газа из расширявшегося петлеобразного волокна. Им могло быть волокно F2, но, скорее всего, это было образовавшееся во время эрупции объединенное волокно F1 + F2 [см. 15, 16].

На пяти изображениях $\text{HeII } 304 \text{ \AA}$ наблюдался выброс, выглядевший как темная тень, двигавшаяся в направлении NNW (рис. 4а–4в) и являвшаяся геометрическим продолжением распрямлявшейся северной оконечности эруптивного волокна F1. Площадь “тени” на уровне 25%-снижения яркости была около 1% от площади солнечного диска, глубина депрессии достигала –65%. Этот выброс хорошо виден и в линии $\text{HeI } 10830 \text{ \AA}$. Наблюдавшиеся несколько позже в корональных каналах димминги существенно отличны по расположению, форме и размерам от движущегося потемнения в

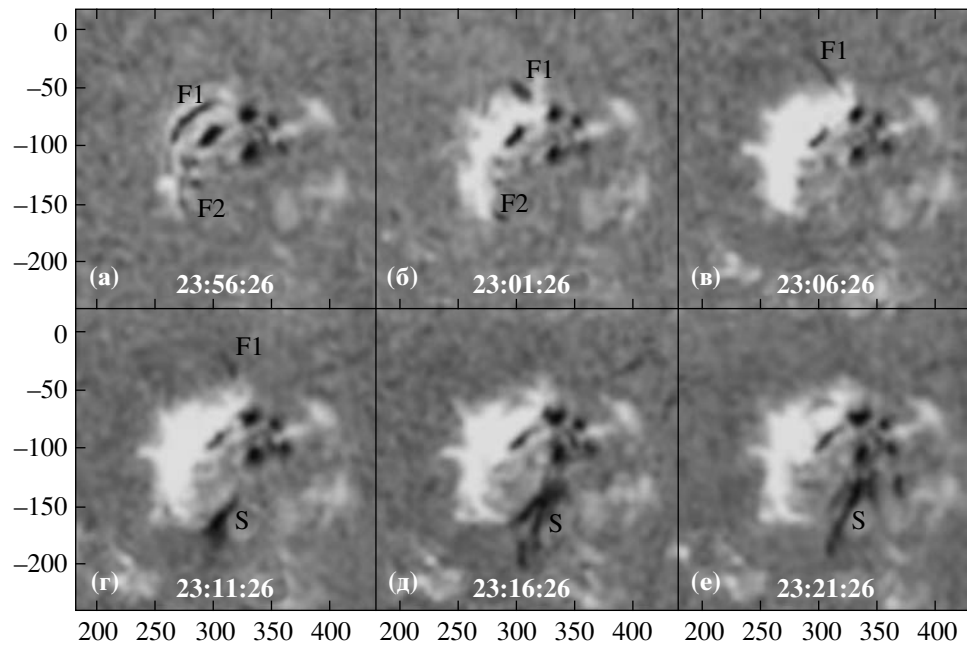


Рис. 3. Эруптивное событие 27.05.2003 на изображениях в линии $H\alpha$, полученных в обсерватории BBSO. F1, F2 — эруптивные волокна, S — возвратный сердж. По координатным осям отложено расстояние от центра солнечного диска в сек. дуги.

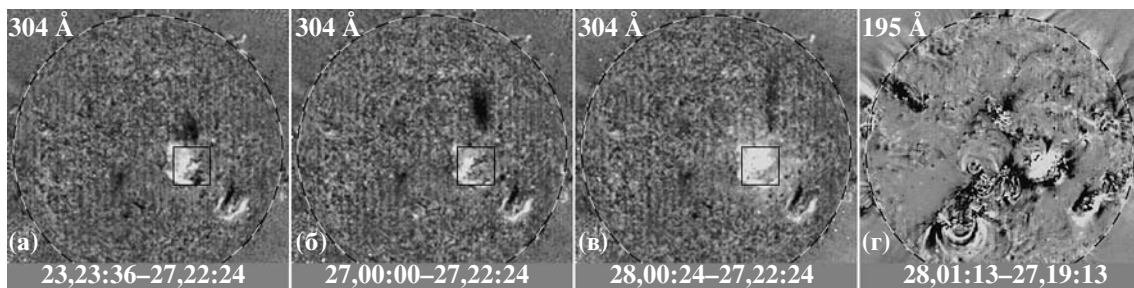


Рис. 4. Фиксированные разностные изображения с компенсацией солнечного вращения в канале 304 \AA (а–в) и в канале 195 \AA (г), полученные по наблюдениям SOHO/EIT для события 27/28.05.2003. Рамкой обозначены границы области, показанной на рис. 3. Черно-белая штриховая окружность — солнечный лимб.

канале 304 \AA (рис. 4). Таким образом, в данном событии северное потемнение выглядит как результат поглощения фонового солнечного излучения в наиболее плотной части расширившегося до огромных размеров петлеобразного волокна.

На изображениях коронографа SOHO/LASCO/C2 в 23:50 или даже еще раньше, в 23:26, появляется гало, по-видимому, являвшееся результатом воздействия ударной волны на корональные лучевые структуры. На последующих изображениях, где видны магнитоплазменные структуры, трудно понять, появились ли они в результате первого или второго события. Возможно, что эруптивные структуры в этих двух событиях продолжали расширяться, не утратив своей целостности.

Вспышки в обоих событиях сопровождалась мощными микроволновыми всплесками. На рис. 5а представлены временные профили первого всплеска и начала второго, записанные радиополяриметрами в Нобейяма. Чтобы выявить начавшийся отрицательный всплеск, начальные уровни вычтены, а потоки ограничены по уровню 20 с.е.п. За спадом первого всплеска последовало дальнейшее снижение потока ниже начального уровня, прервавшееся началом второго всплеска. Начало депрессии хорошо видно, но оценить параметры выброса по поглощению радиоизлучения нет возможности.

2.3. Событие 3: 01.01.2005

В этом событии в активной области NOAA 10715 (N04 E20, $\beta\gamma\delta$ -конфигурация) про-

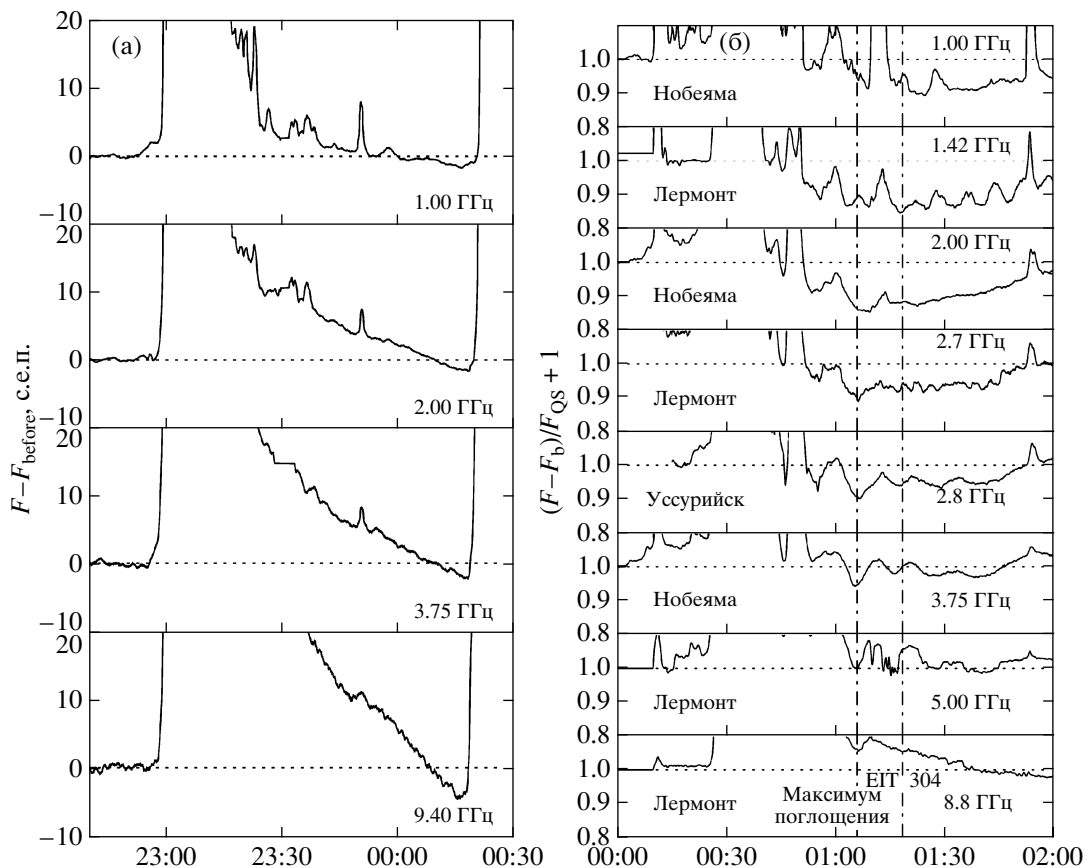


Рис. 5. Временные профили радиоизлучения на разных частотах: (а) — после вычитания предвсплескового уровня радиопотока в событии 27/28.05.2003 (по наблюдениям радиополяриметров Нобеяма); (б) — профили, нормированные к уровню спокойного Солнца в событии 01.01.2005. Вертикальными штрих-пунктирными линиями обозначены моменты максимального радиопоглощения (слева) и наблюдения потемнения в канале EIT 304 Å (справа).

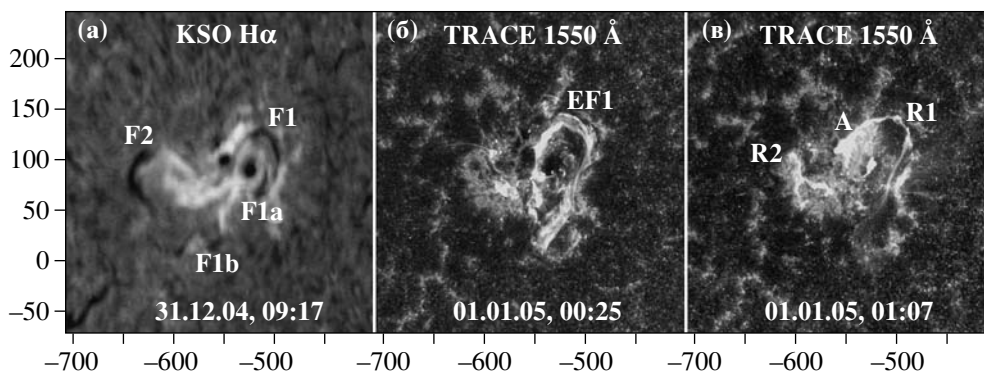


Рис. 6. Активная область 10715 до эрупции 01.01.2005 (а), после вспышки C1.6 (б) и после вспышки X1.7 (в).

изошла рентгеновская вспышка X1.7 (максимум в 00:31), которой предшествовала более слабая вспышка C1.6 в той же области в 00:13. С главным событием были связаны радиовсплеск II типа и замедлявшийся КВМ (средняя скорость 832 км/с). В структуре КВМ ядра не видно. Патрульных наблюдений в линии H α не было, не удалось

найти и наблюдений эрупции в этом событии. TRACE наблюдал первое событие (C1.6) в каналах ультрафиолетового диапазона и зарегистрировал струйные выбросы в этой активной области. В его наблюдениях был перерыв с 00:26 до 01:06, во время которого произошло главное событие, связанное со вспышкой X1.7. Ситуация до и

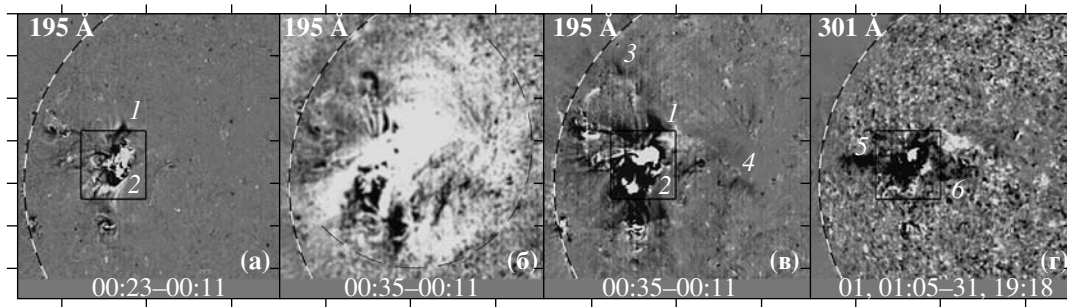


Рис. 7. Фиксированные разностные изображения (с компенсацией солнечного вращения) в каналах 195 \AA (а–в) и 304 \AA (г) в событии 01.01.2005 по данным SOHO/EIT. Рамкой обозначены границы области, показанной на рис. 6. Черно-белая штриховая окружность — солнечный лимб. Тонкой штриховой дугой на изображении (б) обведен фронт “волны EIT”. По координатным осям отложено расстояние от центра солнечного диска в сек. дуги.

после события показана на рис. 6. Изображение в линии $H\alpha$ (обсерватория Канцельхойе) на рис. 6а получено за 15 ч до события. В активной области располагались волокно F1, примыкавшее к восточному пятну, и южнее еще одно волокно F1a. Юго-восточнее находился сегмент F1b, возможно, в том же волоконном канале. Изображения TRACE в линии CIV 1550 \AA (диапазон температурной чувствительности 60–250 тыс. К) показывают ситуацию после вспышки C1.6 (рис. 6б) и после вспышки X1.7 (рис. 6в). На рис. 6б зарегистрировано начало эрупции волокна F1 (EF1), которое к тому времени или с началом эрупции могло слиться с F1a и F1b. На рис. 6в запечатлена стадия спада вспышки X1.7. Компактная аркада A внедрилась в восточное пятно, а ее продолжение на северо-запад и затем на юг — вспышечная лента R1 на месте бывшего волокна F1. В западном пятне также видно свечение. Ленты R2 наблюдались и в восточной части области, куда предположительно могло внедриться волокно F2 за время, прошедшее после наблюдений в Канцельхойе.

Разностные изображения Солнца в канале EIT 195 \AA на рис. 7а–7в показывают возникновение и развитие квазистационарных диммингов 1 и 2 и фронт “волны EIT”, обведенный тонкой штриховой дугой на рис. 7б с запада и юга. Для выявления фронта волны выбран низкий порог ограничения яркости, поэтому внутренняя часть изображения залита излучением вспышки и рассеянным светом. Волна наблюдалась и на изображениях GOES12/SXI в интервале 00:32–00:37. Оцененная по ним скорость фронта в южном направлении составляла около 600 км/с в картинной плоскости. В канале 195 \AA видны и короткоживущие перемещающиеся потемнения, например, 3 и 4 (рис. 7в).

Потемнение 5–6 в канале 304 \AA (рис. 7г) резко отличается расположением и формой от главных корональных диммингов 1 и 2 в канале 195 \AA .

Его площадь на уровне 25%-снижения яркости — около 3% от площади солнечного диска, максимальная глубина потемнения достигала –70%. И в этом событии, как и в событиях 1 и 2, наиболее вероятная причина потемнения в канале 304 \AA — поглощение фонового солнечного излучения в холодном веществе, выброшенном при эрупции волокон F1 и, вероятно, F2. Значительно более слабые признаки поглощения в областях 5 и 6 обнаруживаются и в канале 195 \AA , что согласуется с различием сечений поглощения в этих линиях на порядок.

Наблюдавшееся через полчаса после эрупции потемнение в канале 304 \AA многократно превосходило по размерам волокна F1 и F2 до эрупции. КВМ к этому времени уже появлялся в поле зрения LASCO/C2, т.е. удалился от области эрупции более чем на солнечный радиус. Затенение солнечного излучения расширявшимся выбросом, не исключаемое в событии 27/28.05.2003, трудно представить для потемнения 5–6. Как и в событии 13.07.2004 [4], КВМ не имел явного яркого ядра, обычно отождествляемого с веществом эруптивного волокна. Это также согласуется с предположением, что основная часть волокна не была выброшена высоко в корону вместе с КВМ, а вернулась к солнечной поверхности. Вероятно, при эрупции произошла трансформация магнитной структуры КВМ, и основная часть вещества волокна не вошла в его состав.

В микроволновом диапазоне наблюдался мощный импульсный всплеск с максимальным потоком около 5000 с.е.п. на частотах 10–17 ГГц. За его спадом на частотах ниже 5 ГГц, начиная с 00:51–01:02, следовал отрицательный всплеск, продолжавшийся до 01:50–02:10. На рис. 5б показаны временные профили интегральных потоков радиоизлучения, записанные на ряде частот в обсерваториях Нобеяма (частоты 1; 2; 3.75 ГГц), Усурийск (2.8 ГГц) и Лермонт (1.4, 2.7, 4.9 и 8.8 ГГц). Уровни

потоков до всплеска вычтены, а записи сглажены с шириной окна 30 с и нормированы к уровню излучения “спокойного Солнца”. Длительность и глубина отрицательного всплеска увеличивались к нижним частотам. Максимальная глубина в -13% наблюдалась в 01:06 на частоте 2 ГГц.

3. ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ПОГЛОЩАЮЩЕГО ВЕЩЕСТВА

Возможные причины отрицательных радиовсплесков рассматривались в работе [17]. Главной из них считается затенение излучения компактного источника в активной области веществом выброшенного волокна. События, рассмотренные в нашей статье, а также анализировавшиеся в работах [4, 8] показывают, что существенным может быть поглощение излучения не только компактных источников в активных областях, но и значительных площадей спокойного Солнца. Зависимость поглощения от параметров экрана и частоты регистрируемого радиоизлучения дает возможность оценки параметров экрана по радиоданным на нескольких частотах. Предложенная в работах [4, 8] модель позволяет рассчитать спектр интегрального потока солнечного радиоизлучения с учетом вкладов хромосферы, расположенного над ней на некоторой высоте экрана (вещества эруптивного волокна) заданной площади, и корональных слоев между хромосферой и экраном, а также между экраном и наблюдателем. Сравнением наблюдаемого распределения глубины отрицательного всплеска по частоте со значениями, рассчитанными по этой модели, можно оценить кинетическую температуру, оптическую толщину на каждой частоте, площадь поглощающего экрана и его высоту над хромосферой.

Многочастотные записи отрицательного радиовсплеска достаточно высокого качества для оценки параметров выброса имеются для события 3 (01.01.2005). Измеренные по данным рис. 5б и перенормированные к сумме радиопотоков от спокойного Солнца и затеняемого радиоисточника относительные величины поглощения в момент максимальной депрессии на разных частотах показаны на рис. 8 звездочками, а модельный спектр — линией. Глубина отрицательного всплеска на 1 ГГц могла быть занижена из-за начинавшегося всплеска III типа, что объясняет отличие модели от наблюдений на этой частоте. Наилучшее согласие расчетных кривых с наблюдениями получено при следующих параметрах поглощающего экрана: оптическая толщина на 2.8 ГГц — 2.6, кинетическая температура — 14 000 К, эффективная высота экрана над хромосферой — 50 Мм, площадь экрана — около 5% от площади солнечного диска.

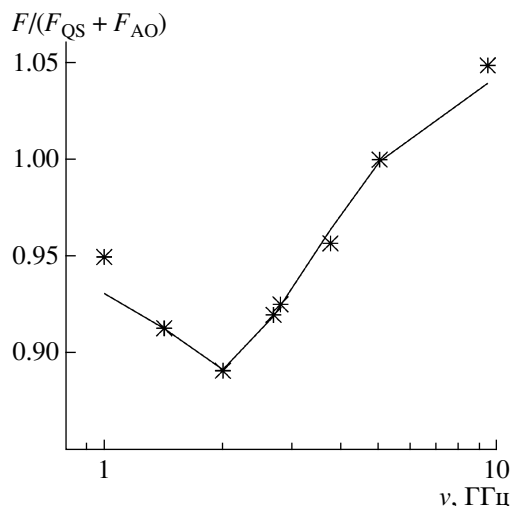


Рис. 8. Измеренные значения радиопоглощения, нормированные к сумме радиопотоков от спокойного Солнца и радиоисточника (звездочки), и вычисленные с помощью модели (линия).

Среднюю концентрацию электронов n_e и массу поглощающего вещества m можно оценить с помощью выражений

$$\tau = \frac{0.2n_e^2 L}{\nu^2 T^{3/2}}, \quad m = m_p n_e S L,$$

где ν — радиочастота, T — кинетическая температура, S и L — площадь и геометрическая толщина экрана, m_p — масса протона. Степень ионизации предполагается близкой к 100%. Оценить толщину экрана рассмотренные наблюдения не позволяют. Исходя из наблюдаемого соотношения размеров потемнения в канале 304 \AA и предполагая геометрическую толщину L поглощающего радиоизлучения экрана близкой к его ширине, получаем $L \approx 70 - 100 \text{ Мм}$, $n_e \sim 10^8 \text{ см}^{-3}$ и $m \sim 10^{15} \text{ г}$, что сопоставимо с массой типичного волокна и среднего КВМ. Полученное значение массы, являясь оценкой сверху, по-видимому, все же близко к реальному значению, поскольку масса зависит от геометрической толщины довольно слабо ($m \propto \sqrt{L}$).

Для события 1 (29.04.1998) имеется высококачественная запись отрицательного радиовсплеска лишь на единственной частоте 2.8 ГГц. Предполагая температуру поглощавшего вещества порядка 10 000 К, а площадь затенявшего экрана равной площади потемнения в 304 \AA (6.5%), с помощью модели можно оценить оптическую толщину экрана $\tau \approx 1.3 - 1.5$. При максимальной геометрической толщине экрана $L \approx \sqrt{S} \sim 300 \text{ Мм}$ средняя электронная концентрация $n_e \sim 0.4 \times 10^8 \text{ см}^{-3}$, а масса $m \sim 2 \times 10^{15} \text{ г}$ — такого же порядка, что и массы

выбросов, оцененные для нескольких событий по многочастотным радиоданным [8].

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Как показывают три рассмотренных эруптивных события и пять проанализированных ранее в работах [4, 8], наиболее вероятной причиной депрессий радиоизлучения, наблюдавшихся как “отрицательные всплески”, было поглощение фонового солнечного радиоизлучения в низкотемпературной плазме эруптивных волокон. Это согласуется с полученными оценками температур затенявших экранов в 8–14 тыс. К и их масс порядка 10^{15} г, близкими к характерным для волокон значениям. Именно эта интерпретация “отрицательных всплесков” была изначально предложена Ковингтоном [7] и подтверждена в большинстве дальнейших исследований [17]. Существенным результатом анализа, проведенного в работах [4, 8] и в данной статье, являются очень большие площади затенявших экранов — от 2 до 15% площади видимого солнечного диска. Значимым оказывается затенение не только компактных радиоисточников в активных областях, но и больших площадей спокойного Солнца. Огромные размеры затенявших экранов согласуются и с максимальной толщиной около 200 Мм, оцененной из наблюдений одного из событий [4] и высотами их нижних краев 20–80 Мм над хромосферой, оцененными по модели.

Для того чтобы затенение спокойного Солнца эруптивным волокном вызвало заметную депрессию радиоизлучения, необходим достаточный контраст волокна на фоне спокойного Солнца, имеющего яркостную температуру T_{QS} , а корона должна быть оптически тонкой. Этим условиям, в основном, удовлетворяет диапазон частот от 1 ГГц ($T_{QS} = 153\,000$ К) до 10 ГГц ($T_{QS} = 12\,000$ К), в котором отрицательные всплески в упомянутых исследованиях и регистрировались. По-видимому, в отдельных случаях возможно наблюдение отрицательных всплесков на частотах, выходящих за пределы этого диапазона. Однако при оцененных температурах экранов в 8–14 тыс. К наиболее благоприятны частоты не выше 5 ГГц ($T_{QS} = 18\,000$ К). Действительно, депрессия во всех восьми случаях была максимальной на частотах 2–4 ГГц, и понятен факт обнаружения Ковингтоном отрицательных всплесков в наблюдениях на традиционной волне 10.7 см (2.8 ГГц).

Как отмечалось во Введении, другой областью спектра, благоприятствующей обнаружению масштабных выбросов низкотемпературной плазмы

эруптивных волокон в поглощении, является линия HeII 304 Å крайнего ультрафиолетового диапазона вследствие высокого сечения фотоионизации этим излучением и наличия дополнительно механизма — резонансного рассеяния излучения плазмой с температурами в несколько десятков тысяч К. По этим причинам вызванные поглощением депрессии излучения в линии HeII 304 Å не видны или еле обнаружимы в корональных эмиссионных линиях, в отличие от глубоких диммингов, обусловленных снижением концентрации плазмы вследствие выброса КВМ. Понятно, что наблюдения таких потемнений в линии HeII 304 Å коррелируют с отрицательными радиовсплесками. Заметим, что депрессии, наблюдавшиеся в рассмотренных событиях 1–3 в линии HeII 304 Å, опускались существенно ниже уровня 50%, ожидаемого для резонансного рассеяния [4], что подтверждает низкие преобладающие температуры затенявших экранов.

Однако имеются существенные различия в свойствах поглощения в микроволновом диапазоне и в линии HeII 304 Å. Главное различие определяется разным характером зависимости оптической толщины поглощающего экрана от концентрации. В микроволновом диапазоне $\tau \sim n_e^2 L \sim L^{-5}$, т.е. оптическая толщина быстро падает с расширением экрана во все стороны при сохранении в нем числа частиц, ответственных за поглощение. Иная ситуация — с поглощением в линии HeII. В первом приближении, пренебрегая температурными и другими эффектами, оптическую толщину можно считать зависящей от первой степени концентрации ($\tau \sim n_e L \sim L^{-2}$), и роль фактора расширения оказывается значительно меньше. Даже если расширение экрана различно в разных направлениях, фактор снижения концентрации в радиодиапазоне доминирует.

Второе отличие связано с различием излучающих слоев, регистрируемых в канале 304 Å и на микроволнах. Основной вклад в фоновое излучение Солнца в линии 304 Å, по-видимому, вносится переходной областью, т.е. на очень малых высотах (<10 Мм). Вклад коронального излучения, в основном, определяется линией SiXI, и для спокойных областей он, по-видимому, невелик. Иная ситуация в радиодиапазоне. Наблюдаемая с Земли яркостная температура спокойного Солнца складывается из излучения хромосферы ($\approx 10\,000$ К) и короны, вклад которой, в отличие от канала 304 Å, на частотах ниже 4.4 ГГц превышает хромосферный. Этот вклад постепенно нарастает с подъемом от хромосферы вверх. Поэтому важнейшую роль в радиодиапазоне играет высота поглощающего экрана. Например, наличие непрозрачного, плотного (для простоты) экрана с температурой

14 000 К, находящегося на большой высоте, приведет к понижению интегрального потока радиоизлучения на низких частотах и повышению на высоких. С другой стороны располагающийся очень низко такой же экран с температурой 10 000 К вообще не проявится в радиоизлучении. В канале же 304 Å в обоих случаях будет наблюдаться одинаковое потемнение. По этим причинам можно ожидать, что отрицательный всплеск, как правило, должен оканчиваться раньше, чем потемнение в 304 Å, которое может наблюдаться до тех пор, пока поглощающий экран располагается выше переходной области.

Таким образом, явления длительного экранирования фонового солнечного излучения могут наблюдаться в линии HeII 304 Å и в радиоизлучении диапазона 1–10 ГГц (предпочтительно ниже 5 ГГц). Однако в канале 304 Å телескоп SOHO/EIT наблюдает, как правило, один раз в 6 ч, поэтому вероятность регистрации таких явлений невысока. Космические обсерватории STEREO и SDO, ведущие более детальные наблюдения в канале 304 Å, функционируют в условиях затяжного минимума солнечной активности. Из очень немногих радиогелиографов наблюдения Солнца в течение дня в интересующем диапазоне частот ведутся только на ССРТ [18], но явлений экранирования после эруптивных событий, связанных со вспышками, на нем пока не зарегистрировано. Возможно, это обусловлено как редкостью таких событий, так и из-за недостаточной чувствительности инструмента, требуемой для их обнаружения на довольно высокой частоте наблюдений 5.7 ГГц ($T_{QS} = 16\,000$ К) в присутствии яркого вспышечного излучения. Главным источником информации о таких событиях в радиодиапазоне остаются записи интегрального радиопотока, но очевидными условиями для их регистрации в этих записях является кратковременность предшествующего вспышечного излучения и отсутствие последующих всплесков. По всем этим причинам информации о таких явлениях пока мало.

В обсуждаемых событиях понижение яркости участков солнечного диска до уровня ниже квазистационарного вызвано поглощением части солнечного излучения в холодном экране. Таким экраном является плазма эруптивных волокон (протуберанцев). Возможны два сценария экранировки. В первом случае форма и соответственно магнитная структура эруптивного волокна не претерпевают существенных изменений. Такое волокно, уходя от солнечной поверхности, расширяется, почти не теряя своей массы, и выглядит как движущийся экран, размеры которого растут, а непрозрачность падает. Возможно, примером такого сценария является событие 2 (27/28.05.2003). Такая ситуация

типична при выбросе волокон вне активных областей (не связанных со вспышками), и наблюдений таких событий множество и на ССРТ, и на радиогелиографе в Нобеяма (частоты 17 и 35 ГГц). Во втором сценарии вся или существенная часть холодной массы эруптивного волокна не покидает Солнце в составе КВМ, а разбрасывается по большой площади над солнечной поверхностью, что предположительно произошло в событии 1 (29.04.1998), а также в событии 13.07.2004 [4]. Такой сценарий не исключен и для события 3 (01.01.2005). Разбрасывание происходит вдоль магнитных силовых линий, которые, по-видимому, не были связаны с волокном до эрупции. Переброс холодной плазмы эруптивного волокна на эти внешние силовые линии возможен при пересоединении потоков внутреннего, принадлежащего волокну, и внешнего магнитных полей. В этом случае можно говорить о “разрушении” магнитной структуры эруптивного волокна. Выброс перестает быть похожим на себя в начале эрупции. Примером является упоминавшееся событие 18.11.2003 [2, 3], когда эруптивное волокно, налетев на невидимое препятствие, визуальным образом превратилось в две широкие расходящиеся струи, несущие вещество волокна к удаленным местам на солнечной поверхности.

Как происходит “разрушение” магнитной структуры эруптивного волокна, является предметом отдельного анализа. Укажем только некоторые возможные причины. Одна из них подтверждена наблюдениями и состоит в прохождении эруптивным волокном нулевой точки коронального магнитного поля (см., например, [19]). Указания на принципиально трехмерный характер происходящего при этом превращения эруптивного волокна в эруптивную струю можно найти в работах [20, 21]. Другой, родственной причиной может являться прохождение поднимающимся эруптивным волокном окрестности точки, в которой происходит бифуркация расположения нейтральных линий радиального компонента магнитного поля. Обнаружить такую область можно по расчетной картине нейтральных линий крупномасштабного поля на различных высотах над солнечной поверхностью. Как известно [22–24], эруптивное волокно в своем движении последовательно повторяет изменяющуюся с высотой контуры одной и той же нейтральной линии. В точке бифуркации эта линия рвется, и у волокна нет возможности сохранить свою целостность после ее прохождения. Подобная бифуркация высотного поведения нейтральных линий была обнаружена нами в упомянутом событии 18.11.2003, анализу которого посвящена отдельная статья.

Аномальной эрупции с “разрушением” магнитной структуры волокна способствует появление в

реальных солнечных условиях нулевых точек и точек бифуркации на пути его следования. Это более вероятно в случае сложной корональной магнитной конфигурации, внутри которой происходит эрупция. Внешними признаками такой ситуации являются сложность магнитной конфигурации, наблюдаемой на фотосфере (все три рассмотренных события происходили в $\beta\gamma\delta$ -конфигурациях) и (или) окружение области эрупции другими активными областями (что имело место в случаях, рассмотренных в [8]). Эти обстоятельства соответствуют и выводу Со́йе [17, п. 4 “Summary and Conclusions”] о тенденции отрицательных всплесков к группировке в комплексах активных областей. В силу этих же причин представляется маловероятной аномальная эрупция спокойного волокна вне комплекса активности. При эрупциях вне активных областей можно ожидать затенения солнечного излучения расширяющимся эруптивным волокном, но его “разрушение” маловероятно.

Действительно, все рассмотренные события были связаны с эрупциями волокон из активных областей, сопровождавшихся вспышками выраженного импульсного характера. Об этом же свидетельствует факт возникновения корональных ударных волн. В исследовании [6] показано, что, в соответствии с наблюдениями, возбуждение ударной волны в нижней короне наиболее вероятно импульсно-поршневым механизмом при эрупции магнитной жгутовой структуры. Затем ударная волна уходит вперед от возбудившего ее поршня и свободно распространяется подобно взрывной волне. Фронт такой волны имеет форму, близкую к сфероидальной. Ее проявлениями вблизи солнечной поверхности могут быть волны Мортонa и распространяющиеся на большие расстояния от области эрупции “волны EIT”, а при удалении от поверхности Солнца — метровые радиовсплески II типа и внешние края корональных транзиентов типа гало. В этом же исследовании показано кинематическое соответствие всех этих проявлений и низкая вероятность других обсуждаемых механизмов возбуждения ударных волн вблизи Солнца.

Во всех трех рассмотренных событиях в метровом диапазоне наблюдались радиовсплески II типа и распространявшиеся на большие расстояния от области эрупции “волны EIT”, а также признаки волны Мортонa в событии 2. Со всеми событиями были связаны достаточно быстрые корональные транзиенты типа гало (средние скорости > 830 км/с), и все они замедлялись. Еще одним указанием на волновой характер этих транзиентов является тот факт, что наибольшая скорость всех трех соответствующих гало наблюдалась в направлениях, существенно отличавшихся от главного направления расширения магнитоплазменных структур КВМ. Именно так может наблюдаться

след сфероидального фронта корональной ударной волны.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы продемонстрировали проявления в различных спектральных диапазонах связанных с мощными вспышками эруптивных событий, за которыми следовало длительное экранирование солнечного излучения. Поглощение фонового излучения Солнца веществом эруптивного волокна может наблюдаться как депрессия излучения в линии HeII 304 Å без выраженных аналогов в корональных эмиссионных линиях крайнего ультрафиолетового диапазона, а также как отрицательный радиовсплеск в микроволновом диапазоне. Потемнения на изображениях, полученных в канале HeII 304 Å, могут наблюдаться значительно позже окончания соответствующего отрицательного радиовсплеска. По высококачественным микроволновым данным на разных частотах с помощью разработанной модели можно оценить параметры выброшенного в проекции на солнечный диск вещества, в том числе его массу. Такие оценки подтвердили, что экранирование происходило веществом эруптивного волокна, и показали, что, помимо затенения излучения компактных источников в активных областях, существенным является экранирование значительных площадей спокойного Солнца.

Известно, что спокойно расширяющееся эруптивное волокно может экранировать солнечное излучение в течение десятков минут и даже нескольких часов. Наблюдения показывают, что в отдельных, по-видимому, редких случаях эрупция может пойти по аномальному сценарию: выброшенное волокно, столкнувшись с непреодолимым препятствием в виде особенности корональной магнитной конфигурации, распадается на части или облако фрагментов. В таком случае вещество волокна не входит в состав коронального выброса, а рассеивается по значительной площади над солнечной поверхностью и, в конце концов, оседает на поверхность Солнца вдали от области эрупции. Располагая единичными примерами таких событий, трудно судить об их общих свойствах, можно лишь высказать некоторые предположения.

Аномальной эрупции должна благоприятствовать сложность магнитной конфигурации, особенно типа δ , и окружение активной области соседними. Такая эрупция может сопровождаться достаточно мощной вспышкой, сердцами или спреями. Серджи, наблюдаемые в линии H α , в ряде случаев могут представлять только самую медленную и плотную часть вещества выброса, реальные размеры которого могут быть значительно обширнее. При аномальной эрупции весьма вероятно возникновение ударной волны, проявляющейся в

метровом всплеске II типа, “волне EUV”, распространяющейся на большие расстояния от области эрупции, и возможной волне Мортонa. Эта ударная волна может быть ответственна и за внешний край возникшего в таком событии коронального транзита, не имеющем явно выраженного ядра. Внешний же его край может быть образован или течением плазмы, приведенной в движение ударной волной, или может представлять собой деформированные волной корональные лучи. Такой корональный транзит, вероятно, имеет высокую скорость и замедляется. Ряд перечисленных свойств, по-видимому, типичен для многих вспышечных эрупций. Если после события наблюдается отрицательный радиовсплеск или обширное потемнение в канале 304 Å, существенно отличающееся от диммингов, видимых в корональных линиях, то в этом событии могла произойти аномальная эрупция.

Авторы признательны В.А. Слемзину за полезные обсуждения и благодарны К. Тэппингу (К. Tarring) за предоставленные данные обсерватории Пентиктон, коллективам обсерваторий Нобеяма и Лермонт за возможность использования данных интегрального потока радиоизлучения на разных частотах, консорциуму SOHO — за данные, использованные при анализе (SOHO — проект международного сотрудничества ESA и NASA). В статье использовались данные каталога CME, созданного и пополняемого NASA в центре данных CDAW и Католическим университетом США в кооперации с Военно-морской исследовательской лабораторией. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 09-02-00115, 11-02-00038, 11-02-00050), интеграционного проекта Сибирского отделения РАН № 4 и программ фундаментальных исследований РАН “Плазменная гелиофизика” и “Солнечная активность и физические процессы в системе Солнце—Земля”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Б. П. Филиппов, *Эруптивные процессы на Солнце* (М: Физматлит, 2007).
2. V. Slemzin, I. Chertok, V. Grechnev, *et al.*, in: *Multi-Wavelength Investigations of Solar Activity*, eds A. V. Stepanov, E. E. Benevolenskaya, A. G. Kosovichev, Proc. IAU Symp. **223**, 533 (2004).
3. V. V. Grechnev, I. M. Chertok, V. A. Slemzin, *et al.*, J. Geophys. Res. **110**, A09S07 (2005).
4. V. V. Grechnev, A. M. Uralov, V. A. Slemzin, *et al.*, Solar Phys. **253**, 263 (2008).
5. H. S. Hudson, J.-L. Bougeret, and J. Burkepile, Space Sci. Revs **123**, 13 (2006).
6. V. V. Grechnev, A. M. Uralov, I. M. Chertok, *et al.*, Solar Phys. (2011, in press).
7. A. E. Covington and H. W. Dodson, J. Roy. Astron. Soc. Canada **47**, 207 (1953).
8. И. В. Кузьменко, В. В. Гречнев, А. М. Уралов, Астрон. журн. **86**, 1114 (2009).
9. J. P. Delaboudinière, G. E. Artzner, J. Brunaud, *et al.*, Solar Phys. **162**, 291 (1995).
10. S. Yashiro, N. Gopalswamy, G. Michalek, *et al.*, J. Geophys. Res. **109**, A07105 (2004).
11. H. Wang, Ph. R. Goode, C. Denker, *et al.*, Astrophys. J. **536**, 971 (2000).
12. И. М. Черток, В. В. Гречнев, Астрон. журн. **80**, 1013 (2003).
13. I. Chertok and V. Grechnev, in: *Coronal and Stellar Mass Ejections*, eds K. P. Dere, J. Wang, Y. Yan, Proc. IAU Symp. **226**, 167 (2005).
14. I. M. Chertok and V. V. Grechnev, Solar Phys. **229**, 95 (2005).
15. A. M. Uralov, S. V. Lesovoi, V. G. Zandanov, and V. V. Grechnev, Solar Phys. **208**, 69 (2002).
16. V. V. Grechnev, A. M. Uralov, V. G. Zandanov, *et al.*, Publ. Astron. Soc. Japan **58**, 69 (2006).
17. C. Sawyer, Solar Phys. **51**, 203 (1977).
18. G. Ya. Smolkov, *et al.*, Solar Phys. **216**, 239 (2003).
19. G. A. Gary and R. L. Moore, Astrophys. J. **611**, 545 (2004).
20. N. S. Meshalkina, A. M. Uralov, V. V. Grechnev, *et al.*, Publ. Astron. Soc. Japan **61**, 791 (2009).
21. B. Filippov, L. Golub, and S. Koutchmy, Solar Phys. **254**, 259 (2009).
22. B. P. Filippov, N. Gopalswamy, and A. V. Lozhechkin, Solar Phys. **203**, 119 (2001).
23. Б. П. Филиппов, Н. Гопалсвами, А. В. Ложечкин, Астрон. журн. **79**, 462 (2002).
24. B. Filippov and S. Koutchmy, Ann. Geophys. **26**, 3025 (2008).