

УДК 523.985-73

ЭРУПТИВНЫЕ ПРОЦЕССЫ В НАЧАЛЕ РАЗВИТИЯ МОЩНЫХ ВСПЫШЕЧНО-АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ НА СОЛНЦЕ

© 2008 г. Л. К. Кашапова¹, М. А. Лившиц²

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

²Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова
Российской академии наук, Троицк Московской области, Россия

Поступила в редакцию 15.12.2007 г.; принята в печать 11.04.2008 г.

Изучается эволюция больших центров активности на Солнце и выясняются условия, приводящие к мощным нестационарным процессам. В дополнение к рассматриваемым в таких случаях обычным факторам (изменение площади пятен, структуры магнитных полей и характера движений), изучается вопрос о том, насколько наблюдения собственно нестационарных процессов (вспышек и связанных с ними корональных выбросов массы) могут быть полезны для предсказания развития таких процессов в ходе последующей эволюции центра активности. Данная проблема обсуждается на примере мощной группы 10486 октября 2003 г., наблюдения которой удалось провести еще до выхода этой группы на восточный лимб, используя наблюдения на космическом аппарате, располагающемся на околомарсианской орбите. Для событий 2003 г. появилась возможность строить изображения вспышек в различных спектральных диапазонах, и можно было подробно изучать высокоэнергичные процессы в изолированной в начале своего развития группе 486 и затем в событиях связанных между собой групп 486 и 484. Анализ своеобразного первого периода развития группы 486 показал, что в дальнейшем можно ожидать усиления активности не только вследствие всплытия новых магнитных потоков (и групп-сателлитов), но и взаимодействия и синхронизации двух, а затем и трех больших групп конца октября 2003 г. Иначе говоря, появление экстремально мощных нестационарных процессов связано в данном случае с относительно более высоким вкладом крупномасштабных магнитных полей. Сделанные выводы сопоставляются с результатами изучения характера движений и магнитных полей в обсуждаемом центре активности за время всего прохождения по диску с 23 октября по 5 ноября 2003 г.

PACS: 96.60.qe, 92.70.Qr

1. ВВЕДЕНИЕ. НЕКОТОРЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ О ПРОГНОЗИРОВАНИИ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ

В некоторые эпохи солнечная активность становится очень высокой — серии мощных вспышек возникают в данной активной области или их комплексах. Так было в августе 1972 г., в июне 1991 г., октябре 2003 г., январе 2005 г.; несколько меньшая вспышечная активность была характерна для ноября 2000 г. и еще нескольких периодов. Изучение особенностей развития тех центров активности, в которых происходят серии мощных вспышек, представляет интерес как с точки зрения физики протекающих процессов, так и для прогнозирования космической погоды.

Сейчас уже многие факторы, определяющие геомагнитную обстановку и уровень высокоэнергичной радиации, достаточно хорошо известны. Поэтому в тех случаях, когда нестационарное событие на Солнце уже начало регистрироваться,

можно с достаточной степенью точности предсказывать картину развития явления в околоземном пространстве и на Земле, которое будет происходить через некоторое время (от получаса до суток) после начала события на Солнце. Разумеется это справедливо только в том случае, если солнечные явления регистрируются практически в реальном времени в нескольких спектральных диапазонах. Так, в последние годы (в частности, в 2003 г.) существенную информацию обеспечивал космический аппарат (КА) SOHO, регистрирующий корональные выбросы массы (СМЕ) и корональные источники излучения в крайней ультрафиолетовой (EUV) области. Кроме того, в это же время те или иные проявления солнечной активности регистрировались на спутниках серии GOES, TRACE, КОРОНАС-Ф и др. У нас и во всем мире успешно пытаются формализовать этот прогноз, разрабатывая соответствующие компьютерные программы. В ведущих научных центрах, занятых кратко-

срочными прогнозами, непосредственное участие человека требуется лишь в некоторых нетипичных и сложных случаях.

Предсказание космической погоды опирается в решение двух серьезных научных проблем. Первая из них относится к сильной переменности B_z -компоненты межпланетного магнитного поля (ММП), которую невозможно прогнозировать с необходимой точностью даже по известным условиям на Солнце и в межпланетном пространстве. Поэтому по солнечным данным можно достаточно надежно говорить о том, будет на Земле магнитная буря или нет, но оценить ее амплитуду трудно. Этому посвящено много научных публикаций.

Вторая проблема прогнозирования, имеющая большее значение для предсказания радиационной обстановки, относится к характеру эволюции тех областей или комплексов активности, где развиваются большие вспышки. Этой классической проблеме уделялось большое внимание начиная с середины XX в., когда при помощи магнитографов стали измеряться магнитные поля. Большие надежды возлагались на изучение изменения магнитных полей центров активности на фотосферном уровне, где собственно и измерялось магнитное поле. Первый вывод состоял в том, что вспышечная активность ассоциируется с резкими изменениями магнитного потока центра активности: вспышки чаще возникают как при нарастании потока, так и в начале его заметного уменьшения, обычно уже при разрушении группы пятен. Хотя статистически этот результат справедлив и верно отражает тенденцию, он не очень помогает в краткосрочном прогнозировании на одни или несколько суток. Обычно он существенно дополняется вторым результатом, относящимся в основном к появлению больших вспышек: самая высокая вспышечная активность характерна для сформировавшейся δ -конфигурации, т.е. появлении участков противоположной полярности магнитного поля в полутени доминирующего пятна (здесь и далее используется Маунт-вилсоновская классификация групп пятен). На протяжении всех последних лет фотосферные наблюдения показывают, что усложнение магнитной конфигурации во многих случаях происходит за счет сдвиговых движений (шира). С точки зрения влияния на уровень вспышечной активности наиболее существенны движения, параллельные нейтральной линии, но противоположно направленные. Локальная гелиосейсмология позволяет обнаруживать такие движения и в подфотосферных слоях, на глубинах около 10 тыс. км [1].

Итак, при разработке прогноза космической погоды на срок от нескольких суток до месяца приходится решать вопрос о характере эволюции центров активности. Изменение площади пятен и магнитной конфигурации являются, конечно,

важными характеристиками. Для большинства не очень больших групп, как правило униполярных или биполярных (классов α, β), характерно то, что изменение площади со временем обычно достигает максимума и затем плавно спадает. В каком-то смысле “стадии стабильного существования активной области нет”, как было отмечено Григорьевым и Ермаковой [2] еще в 1986 г. Однако иногда изменение магнитного потока достигает больших значений и остается близким к максимальному в течение нескольких суток. Это относится ко всем перечисленным выше случаям, где происходили серии больших вспышек; для анализируемой ниже группы 10486 в октябре 2003 г. само изменение потока приводится в [3].

Для мощных событий собственно вспышку и ассоциированный с ней СМЕ следует рассматривать как две стороны одного и того же нестационарного процесса. В этом смысле сейчас появляются некоторые указания на то, что возникновение больших вспышек не только является результатом эволюции локальных магнитных полей центров активности, но и определенную роль играют крупномасштабные поля. Возможно, различие особенностей вспышек в ноябре 2000 г. и октябре 2003 г. было связано как раз с различным расположением вспышечно-активного центра по отношению к линии раздела полярности крупномасштабного поля.

Спрашивается, можно ли указать какие-либо особенности нестационарных процессов, которые отличают развитие серии вспышек в появившемся из-за края или возникшем на видимом диске центре активности? Мы попытались изучить этот вопрос, используя все имеющиеся наблюдательные возможности. Однако при анализе ситуаций при восходе группы эта информация чаще всего отсутствует, и оказывается очень трудно предсказать, по какому пути будет развиваться группа, только что вышедшая из-за края. Однако здесь иногда удается использовать новые возможности, связанные с наблюдениями на КА в различных точках гелиосферы.

Ниже рассматривается развитие активных явлений, которое проводилось в один из эпизодов работы предсказания космической погоды, который совпал с возникновением мощной вспышечной активности группы 10486 в конце октября 2003 г. На КА “Mars Odyssey” наблюдался восход этой группы примерно за 2 сут до ее появления на лимбе для инструментов, располагающихся на Земле или околоземных орбитах [4]. В проводимом ниже анализе используются уже не только данные, которыми мы оперировали в текущем прогнозе 2003 г., а вся доступная информация, включая результаты RHESSI. Во разделе 2 статьи дается краткая информация об активности в этот период, далее в разделе 3 — некоторые особенности используемых

данных и способов их обработки. Результаты изучения активности при восходе группы 486 и первом эпизоде вспышечной активности уже на диске даны разделах в 4 и 5. В заключение обсуждаются полученные выводы и возможности их дальнейшего развития.

2. ВСПЫШЕЧНАЯ АКТИВНОСТЬ В ОКТЯБРЕ 2003 Г. И ЕЕ СРАВНЕНИЕ С ЯВЛЕНИЯМИ В ДРУГИЕ АНАЛОГИЧНЫЕ ПЕРИОДЫ

Данная статья посвящена в основном возникновению вспышек в больших центрах активности. В ходе последних нескольких циклов наблюдались несколько периодов прохождения по диску активных областей, в которых наблюдались серии мощных нестационарных процессов. Условно эти случаи можно разделить на несколько групп, различающихся расположением центра активности относительно нейтральной линии крупномасштабного магнитного поля и характера взаимодействия основного большого центра активности и других центров, развивающихся в это же время на диске. Редкими являются случаи, когда группа пятен большой площади располагается на большом удалении от нейтральной линии крупномасштабного поля, в средней части холма униполярного поля большой площади. Одним из примеров могут служить события в ноябре 2000 г. (см., например, [5]), когда активность вблизи большой группы пятен привела к серии достаточно мощных, но быстрых вспышек. Самым распространенным случаем является ситуация, когда громадный центр активности располагается непосредственно на линии раздела полярности крупномасштабного поля. В таком случае появление в окрестности основного центра групп сателлитов с пятнами противоположной полярности приводит к сильному увеличению уровня вспышечной активности. Экстремальной здесь является ситуация, когда возникает взаимодействие небольших центров активности вокруг основного центра, как это было, например, в августе 2000 г. [6] и в декабре 2005 г. [7]. В этом случае развиваются мощные вспышки, которые состоят из большого импульса и продолжительной постэруптивной фазы.

Оказалось, однако, что необычайно высокая вспышечная активность может возникать при взаимодействии центров активности, располагающихся на нейтральной линии крупномасштабного магнитного поля на очень больших расстояниях один от другого. Один из таких примеров рассматривается в этой работе. Так, в октябре 2003 г. на диске Солнца наблюдались 3 группы пятен 10484, 10486 и 10488 (в дальнейшем обозначаемые без указания номера месяца). В самой активной группе 486 за время прохождения по диску наблюдалось

17 вспышек балла С, 18 — балла М и 7 — балла Х, включая 4 вспышки, балл которых достиг Х10 и выше. Заметим, что это усиление активности произошло далеко от максимума, на фазе спада цикла.

Аналізу сложных явлений в октябре 2003 г. посвящено очень много работ. Их краткое изложение и библиография работ до 2005 г. собственно по явлениям на Солнце, а также солнечно-земным связям содержится в [8]. За последнее время появились еще ряд статей, из которых для темы нашей работы представляют интерес работа Чумака и др. [9], где изучается связь нестационарных процессов с магнитными полями, и Чертока и Гречнева [10], в которой детально анализируются именно крупномасштабные особенности развития вспышечной активности и, в частности, выявлены отдельные каналы, в которых происходит потемнение на рентгеновских изображениях — димминги, связывающие отдельные центры активности. В подавляющем большинстве работ по этому активному периоду рассматривались в основном события после 26 октября 2003 г., когда группа 486 находилась вблизи центра диска. Наша работа дополняет эти исследования рассмотрением событий в самом начале развития группы 486, еще до выхода ее на восточный лимб для земного наблюдателя. Основное внимание уделяется особенностям развития эруптивных процессов, которые предшествовали выходу группы в такое состояние, которое обусловило чрезвычайно высокий уровень вспышечной активности 27–29 октября и 4–7 ноября 2003 г. Существенной проблемой, по нашему мнению, является выяснение причин, которые привели к формированию сдвиговых движений (шира) и поддержке такого состояния центра активности в течение довольно длительного времени. Если обычным является появление групп сателлитов около основного центра активности, то в данном случае явно это не наблюдалось. В статье обсуждается возможность того, что взаимодействие сильно удаленных друг от друга, но связанных между собой групп может являться причиной поддержки завершенности движений или спиральности в области, окружающей основные пятна группы 486.

3. НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ НАБЛЮДАТЕЛЬНОГО МАТЕРИАЛА И ЕГО ОБРАБОТКИ

Как в работе по предсказанию космической погоды в 2003 г., так и сейчас при подготовке этой статьи мы широко использовали результаты наблюдений Солнца на КА GOES, SOHO, TRACE, RHESSI, КОРОНАС-Ф и “Mars Odyssey”. Сделаем здесь несколько замечаний, относящихся к использованию этих материалов в проводимом ниже исследовании явлений 2003 г.

В последние годы большой объем информации о явлениях на Солнце поступает от КА SOHO. В работе широко использовались данные приборов SOHO/EIT и SOHO/LASCO как в виде изображений, так и в числовом представлении (FITS-файлы). В частности, для нескольких событий, наблюдавшихся на КА “Mars Odyssey” на невидимой с Земли стороне Солнца, строились разностные изображения SOHO/EIT в диапазоне 195 Å. При этом использована методика Чертока и Гречнева [11], учитывающая вращение Солнца между моментами экспозиции. Полученный фильм для вспышки 21 октября 2003 г. доступен на сайте <http://uranus.sai.msu.ru/~ilusha/mlivshits/>. Как правило, физические параметры CME заимствованы из каталога LASCO, но в некоторых случаях проводился дополнительный анализ, позволяющий определить скорости и массы выбросов.

7 апреля 2001 г. был запущен спутник “2001 Mars Odyssey”, где в составе комплекса аппаратуры (в составе гамма-спектрометра GRS) находился детектор нейтронов высоких энергий HEND, разработанный в лаборатории И.Г. Митрофанова в ИКИ РАН. Основной задачей этой аппаратуры являлось изучение Марса. Два сцинтилляционных детектора HEND при полете к Марсу с 7 апреля по 24 октября 2001 г. и на орбите около Марса попутно регистрировали жесткое рентгеновское и гамма-излучение солнечных вспышек. Первые результаты стереоскопических эффектов вблизи лимба по наблюдениям на марсианском аппарате “Mars Odyssey” и на околоземных КА опубликованы в [4].

В приборе HEND сцинтиллятор из стильбена окружен внешним детектором антисовпадательной защиты на основе кристалла CsI. Прибор регистрирует фотоны в области энергий 30 кэВ–1 МэВ. В этой работе используются главным образом временные профили, получаемые внешним детектором с временным разрешением 0.25 с. Максимум полосы чувствительности располагается около 80 кэВ. Ниже в работе используются данные этого своеобразного рентгеновского фотометра, представленные в [4]. Временные профили для излучения с энергией, превосходящей 330 кэВ, получались с временным разрешением 1 с. Кроме того, каждые 20 с регистрировались спектры в каждом сцинтилляторе в 16 энергетических каналах.

Ряд событий был зарегистрирован различными приборами спутника КОРОНАС-Ф, работавшего с 31 июля 2001 г. по март 2005 г. В этой работе используются в основном данные патрульного детектора прибора СПР-Н. Этот прибор включает систему поляризационных датчиков для измерения поляризации излучения солнечных вспышек и патрульный детектор для мониторинговых измерений интенсивности рентгеновского излучения Солнца в

диапазоне 15–100 кэВ. Результаты, относящиеся к исследуемым событиям октября 2003 г., рассмотрены в [12].

КА RHESSI [13, 14] позволяет получать информацию об излучении Солнца в жестком рентгеновском диапазоне от 3 кэВ до 7 МэВ. В результате обработки данных наблюдений этого КА возможно получать информацию об эволюции потоков излучения, получать спектральные характеристики и двумерные изображения источников излучения. Пакет программ, созданный командой RHESSI для обработки данных, написан для интерактивного языка обработки данных IDL (версия 5.4 и выше). Пакет входит в библиотеку SOLAR SOFT (SSW) и находится в свободном доступе по адресу <http://sohowww.nascom.nasa.gov/solarsoft/>. Там же находятся все необходимые инструкции для установки, а также файлы, составляющие базу данных, которая содержит информацию, необходимую для работы программ (данные телеметрии, каталог файлов, каталог вспышек и прочее).

Существует два основных архива с данными: GSFC (Мериленд, США; <http://hesperia.gsfc.nasa.gov/hessidata>) и ETH (Швейцария; <ftp://hercules.ethz.ch/pub/hessi/data>). В настоящем исследовании использовались как “сырые” данные с нулевым уровнем обработки (Level-0), так и сводные данные наблюдений с уровнем обработки 1 (Level-1).

Сводные данные наблюдений RHESSI (The RHESSI Observing Summary Data – Quicklook Data) представляют собой содержащие поток файлы, которые разбиты на стандартные энергетические полосы (например, 3–6 кэВ, 25–50 кэВ) и имеют грубое временное разрешение (4 с). Эта информация записывается в ежедневный FITS-файл. В настоящее время этот файл вместе с соответствующим интересующему моменту времени файлом, содержащим данные нулевого уровня, можно получить в одном из архивов.

Использование графического приложения GUI (Graphical User Interface to the HESSI) позволяет выполнять следующее:

- выбирать временной и энергетический диапазоны для исследования;
- визуализировать информацию (скорректированные за усиление и изменения условий наблюдения потоки в стандартных энергетических диапазонах, данные телеметрии);
- строить кривые блеска для произвольных энергетических диапазонов и с произвольным временным разрешением;
- восстанавливать двумерное изображение источника;
- подготавливать данные для спектральных исследований программой OSPEX.

Построение кривых блеска с временным разрешением меньше 4 с осложняется, если в процессе наблюдений изменялись диафрагмы или менялось усиление. Исправление этих эффектов возможно только для 4-с временного интервала (один оборот КА). Эту информацию можно получить или из ежедневных файлов, или с помощью программы OSPEX.

Для восстановления изображения источника необходимо знать область, где наблюдалось событие. Это можно сделать, или используя каталог вспышек RHESSI, или вручную. Программное обеспечение предлагает различные алгоритмы восстановления изображения от восстановления без какой-либо коррекции (Back Projection) и такого распространенного восстановления как “чистка” (CLEAN), до методов наименьшей энтропии (MEM SATO и VIS) и алгоритма PIXON [15, 16]. В работе [17] было проведено сравнение результатов, полученных с помощью различных алгоритмов. Лучший результат для источников со сложной структурой показал алгоритм PIXON, поэтому для большинства случаев мы использовали этот алгоритм. К сожалению, одним из недостатков этого алгоритма является его низкая скорость.

Графическая оболочка программного обеспечения позволяет подготовить файлы для дальнейшего исследования спектров. Подготовка заключается в разбиении на спектральные полосы с необходимым для поставленной задачи разрешением, разбиением на временные интервалы, а также вычисление коэффициентов, необходимых для калибровки и перехода от отсчетов детекторов к фотонам. В дальнейшем с помощью программы OSPEX возможно построение спектров и их анализ.

4. ВОСХОД ГРУППЫ 10486 ПО НАБЛЮДЕНИЯМ С КА НА МАРСИАНСКОЙ И ОКОЛОЗЕМНЫХ ОРБИТАХ

С 18 октября 2003 г. активность на диске была связана с группой 484 (рис. 1), где до 21 октября видно несколько мощных вспышек.

21 октября 2003 г. для спутника “Mars Odyssey” были доступны для наблюдения области Солнца, располагающиеся на 24° за тем восточным лимбом, который наблюдался с Земли. С начала этих суток стало отмечаться некоторое различие в данных этого спутника и наземной информацией: слабые всплески наблюдались по времени близко к вспышкам в группе 484, но не точно совпадали с ними, обычно несколько запаздывая. Складывалось впечатление, что появился некоторый источник всплесков — скорее всего в самой мягкой области 30–50 кэВ, которую еще чувствовала аппаратура HAND. Около 4^h UT на SOHO/LASCO

наблюдался мощный СМЕ. В первом сообщении указывалось, что этот СМЕ связан с событием, располагающимся за восточным лимбом. Однако затем это СМЕ стали считать следствием вспышки, произошедшей в группе 484. Сейчас, когда стали доступны все наблюдения из разностных снимков этого СМЕ в LASCO/C2, ясно, что это событие отчетливо наблюдается не только вокруг восточного, но и вокруг западного лимба, т.е. как и указывается сейчас в каталоге, является полным гало. Это однозначно указывает на то, что событие связано с процессами на невидимой с Земли стороне Солнца.

21 октября около 18:45 UT на “Mars Odyssey” наблюдалась импульсная вспышка. На рис. 2а приводится ее профиль в диапазоне энергии около 80 кэВ. Эта вспышка располагалась практически точно на лимбе в наблюдениях с марсианской орбиты. Обратим внимание на наличие двух импульсных возрастаний (указанных как 1–2–3 и 4), разнесенных примерно на 5 мин. По измеряемому жесткому излучению и сравнению жесткого и мягкого рентгеновского излучения для других явлений, наблюдаемых на диске, можно прийти к заключению, что это событие было близко к вспышке балла М5.

На околоземных аппаратах эта вспышка не наблюдалась. На спутнике GOES около 19^h UT наблюдалось усиление фона мягкого рентгеновского излучения (рис. 1). На приборе SOHO/EIT в диапазоне 195 Å в начале суток 21 октября стала отмечаться активность на восточном лимбе. По изображениям SOHO/EIT были сделаны разностные фильмы как по соседним кадрам, так и относительно момента 18:12 UT (с учетом эффекта вращения Солнца), аналогичные тем, которые строились и использовались в [11]. На этих фильмах видно, что после момента 18:48 UT в соответствующем позиционном угле появляются арки, сопровождающие развитие события, зарегистрированного на “Mars Odyssey”. В промежуток времени между 19:13–19:48 UT отчетливо наблюдаются две арочные системы и намечается еще одна более северная система (рис. 2в). Начиная с 19:48 UT в том же месте наблюдается новое событие, включающее в себя как СМЕ, так и вспышку. Оно привело к последующему ускорению подъема существующих ранее двух арочных систем и существенному усилению третьей, более северной системы. Заметим, что в области существования трех этих систем за два часа после 18:12 UT формируются три димминга, которые указывают, по-видимому, на эвакуацию газа из этих корональных областей.

Однако для этого случая и для других аналогичных ситуаций СМЕ, конечно, отчетливо наблюдались. Так, в промежуток времени между 15^h UT 21 октября и 4^h UT 22 в оперативных данных

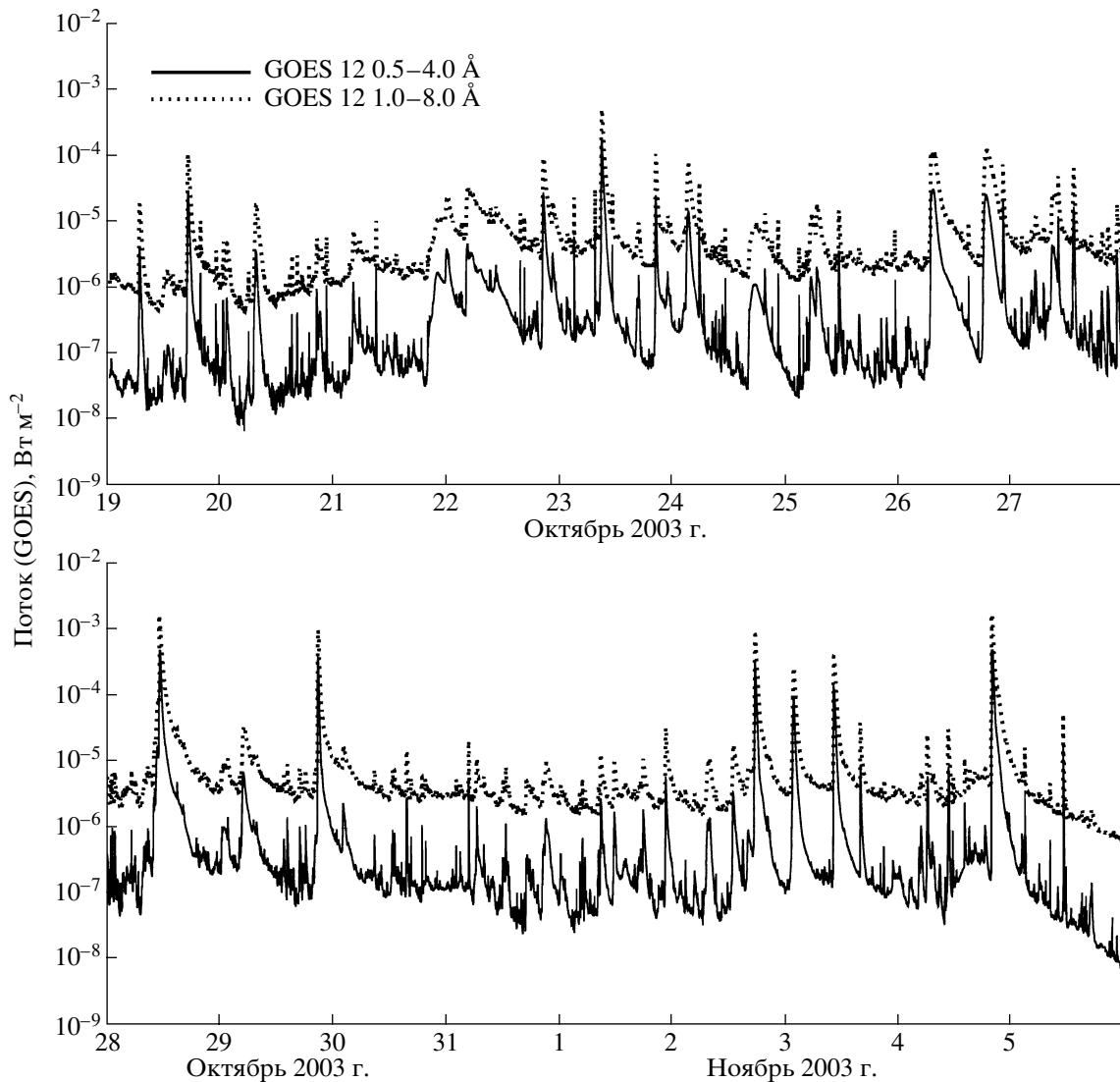


Рис. 1. Мягкое рентгеновское излучение по данным спутников GOES.

LASCO были выделены 6 CME при позиционном угле около 120° , соответствующем восходящей группе 486. Выделение этих CME среди узких выбросов в этой области лимба было довольно условным, и в окончательный каталог вошли два события. Один из этих CME, отмеченный в каталоге как появившийся в поле зрения LASCO/C2 в 19:54:05 UT (рис. 2б), и был связан с событием, зарегистрированным на КА “Mars Odyssey”.

Таким образом, хотя вспышки явно не наблюдались на восточном лимбе на околоземных орбитах, активность восходящей группы 486 проявилась как в серии CME, так и при подъеме постэруптивных систем. Можно также отметить, что несколько ранее началась шумовая буря, а затем и повышенное излучение в микроволновом диапазоне [10]. С импульсной вспышкой, зарегистрированной на “Mars Odyssey”, были связаны системы петель, причем

оси первой и второй системы были, по-видимому, достаточно сильно повернуты одна относительно другой. Заметим, что значительное увеличение активности лимба было уже связано с мощным CME, который наблюдался на LASCO/C2 после 20:58 UT 21 октября.

22 октября активность на восточном лимбе заметно усилилась. На фоне развивающихся систем петель на снимках SOHO/EIT выделялись вспышки в группе 486 (3:28 UT — M3.7, 8:30 UT — M1.7, 9:37 UT — M1.7, 15:06 UT — M1.4, 15:57 UT — M1.2, 19:47 UT — M9.9, 21:56 UT — M2.1), которые на регистрации GOES (рис. 1) выделялись довольно условно. Одна из этих вспышек показана на рис. 2г. Спектр рентгеновского излучения, наблюдаемого на “Mars Odyssey”, был довольно мягким и 2 импульса наблюдались через 4–5 с один после другого [4,

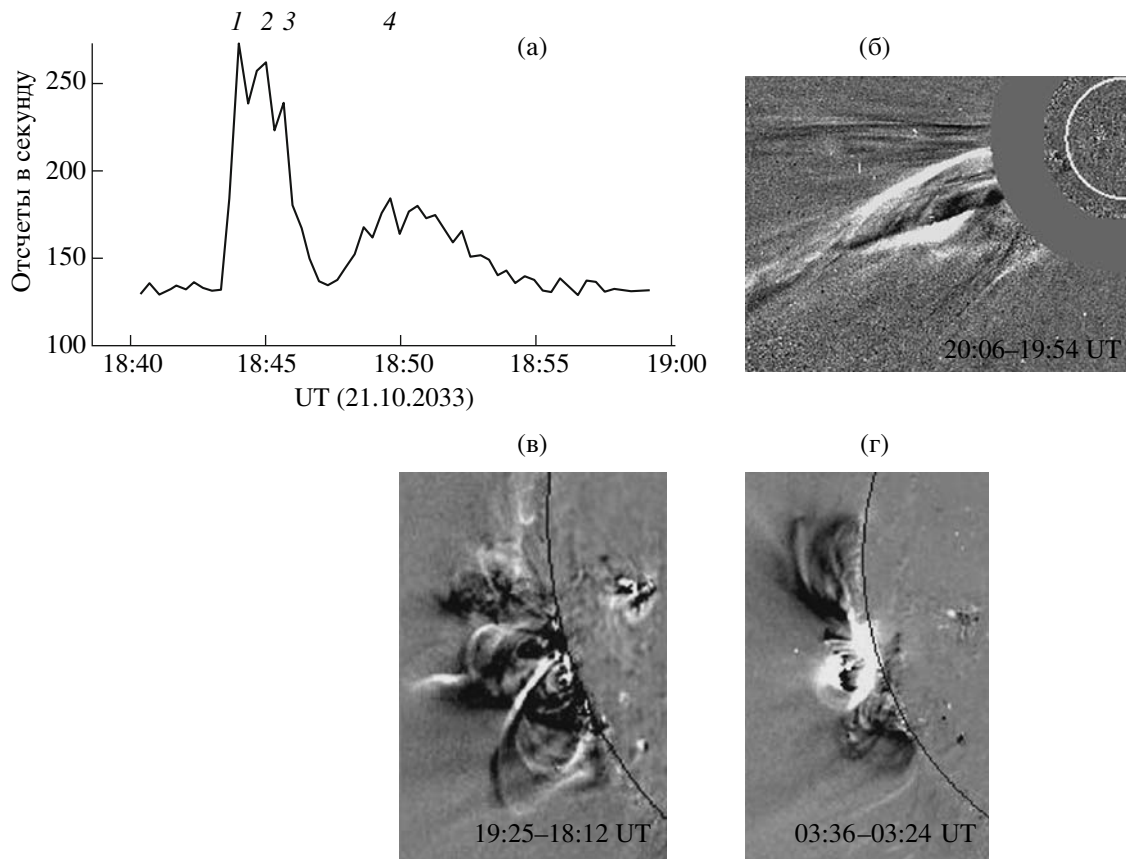


Рис. 2. (а) — Регистрация рентгеновского фотометра с осреднением 20 с (режим регистрации спектров) 21 октября 2003 г. Указаны отдельные максимумы, среди которых в максимумах 1 и 4 вклад излучения в диапазоне 30–80 кэВ является доминирующим. (б) — Разностное изображение LASCO/C2 из архива SOHO. (в) — Разностное изображение 21 октября 2003 г. в диапазоне 195 Å. (г) — Разностное изображение 22 октября 2003 г. в диапазоне 195 Å.

рис. 5а]. Скорее всего это связано с тем, что жесткое излучение возникает низко, и наблюдаются только основания низкой петли. Для этой вспышки второе основание высокой корональной петли и, возможно, еще один источник мягкого излучения располагался еще за лимбом при наблюдении с околоземных орбит. Характерным является то, что наряду со вспышечными петлями, высота которых достигала 20–30 тыс. км, к северу и к югу наблюдались димминги. Это, возможно, привело к некоторому занижению балла этой вспышки, частично располагающейся за лимбом. После 4:24 UT в диапазоне 195 Å на SOHO/EIT наблюдалась арочная система.

Вспышка M9.9 около 20^h UT 22 октября уже наблюдалась на спутниках на околоземных орбитах, в частности, на КА КОРОНАС-Ф [12]. Основания петель, скорее всего, были лишь частично доступны, что влияло на наблюдения жесткого рентгеновского излучения. Связанный с этой вспышкой СМЕ уже был достаточно мощным, в

отличие от связанных со вспышками серии СМЕ во второй половине суток 21 октября.

Резюмируя, можно сказать, что 21–22 октября наблюдался восход нового центра активности. Соответствующая группа пятен не наблюдалась в предшествующем кэррингтоновском обороте. В возникшей на невидимой стороне диска Солнца группе активность 21–22 октября существенно усилилась. По аналогии со многими небольшими группами, развитие которых наблюдается на видимой полусфере, можно было с большой вероятностью считать, что в эти дни происходил значительный рост площади пятен. Такое заключение основано на многочисленности слабых эруптивных событий, сопровождающихся большим числом выбросов. Это обычно характерно для вспышечной активности развивающихся групп, но серии узких СМЕ возникают не так часто. В данном случае это было определенной особенностью нового локального магнитного поля.

Однако после мощной быстрой вспышки данная особенность исчезла, и СМЕ начали захватывать

большую часть восточного лимба. Арочные системы вспышек 21–22 октября оказались уже сложными — скорее всего, такими, как у сигмоидных вспышек. Уже 22 октября начали наблюдаться выбросы в экваториальном направлении, из группы 484 к группе 486, что вызывало там развитие новых, хотя и слабых, нестационарных явлений (см. далее рис. 8а). Это дает основания предполагать, что нестационарные процессы начали развиваться уже в крупномасштабной магнитной конфигурации.

Итак, существенным в развитии вспышечной активности явилось довольно мощное импульсное событие, произошедшее 21 октября около 19^h UT, которое наблюдалось только на спутнике “Mars Odyssey”. В дальнейшем серия слабых вспышек 22 октября и развитие мощных СМЕ характеризовало вспышечную активность появившейся группы большой площади. Эта активность далее могла или пойти на спад, или под воздействием тех или иных причин существенно усилиться. Дальнейшие наблюдения за этой группой дают некоторые указания на то, почему развитие группы пошло именно по второму пути.

5. ВСПЫШКИ НА ДИСКЕ 23–24 ОКТЯБРЯ 2003 г.

Анализ наблюдений 21–22 октября давал основания ожидать заметного увеличения активности группы 486. Первая мощная вспышка серии произошла 23 октября около 08:30 UT. Уже по данным GOES (рис. 1) можно сделать вывод о том, что эта X5.7-вспышка была достаточно короткой — интенсивное мягкое рентгеновское излучение длилось всего полчаса. Постэруптивные петли начали проявляться только тогда, когда вспышечное излучение практически закончилось. Это следует также и из данных SOHO/EIT в диапазоне 195 Å, где подъем аркады начинается в 12:24 UT, продолжается в течение нескольких часов вплоть до 17:30 UT и затем постепенно замедляется. Следующая мощная вспышка началась в 20:24 UT.

Условия наблюдения вспышки 23 октября около 8:30 UT на “Mars Odyssey” были значительно лучше, чем на околоземных орбитах, так как на спутниках RHESSI и КОРОНАС-Ф наблюдалась только ее заключительная стадия. На рис. 3 приведен временной профиль изменения рентгеновского излучения в диапазоне около 80 кэВ. Данные были получены в режиме получения профилей внешнего сцинтиллятора аппаратуры HEND с временным разрешением 1/4 с. Видно, что всплеск состоит из двух пиков, разнесенных на 2–3 мин, и затем несколько максимумов достигаются через 15 мин после основного максимума [4]. В этом случае надежный сигнал выделялся также во время первой

части всплеска в 8:25–8:29 UT и по данным внутреннего сцинтиллятора в области энергии более 300 кэВ.

Несмотря на то, что наблюдения на спутнике RHESSI начались только в 8:44 UT, потоки излучения в области до 100 кэВ регистрировались надежно. Это позволило провести работу по восстановлению изображений для нескольких моментов времени. Так, на рис. 4 приведены восстановленные методом PIXSON изображения для начального периода наблюдений на RHESSI. На изображениях, построенных в диапазоне 12–25 кэВ, хорошо видны несколько петель. Основание одной из них, самой яркой и на рисунке самой высокой, совпадает с двумя источниками более жесткого рентгеновского излучения в диапазоне 50–100 кэВ. Также видны другие петли аркады, в частности, севернее основной, формирующиеся на высотах порядка 20 тыс. км. (рис. 4). В дальнейшем высота петель увеличивалась, что следовало как из построенного нами изображения в диапазоне 12–25 кэВ в момент 9:35 UT, так и из наблюдений высокой аркады с 12^h до 17^h на SOHO/EIT в диапазоне 195 Å.

Радиоизлучение этой вспышки наблюдалось в ИЗМИРАН. Временные профили приведены на рис. 6 в работе [4], где на профиле радиовсплеска на длине волны 10 см видны как два обсуждаемых здесь всплеска, разнесенных на 15 мин, так и максимум излучения около 9:00 UT, после которого в течение часа регистрировалось постепенное уменьшение излучения. Постэруптивная фаза четко регистрируется после 9:00 UT.

Регистрация спектрографа ИЗМИРАН в метровом диапазоне приведена на рис. 5. Здесь видно, что радиовсплески III типа начались в 8:24 UT, стали очень интенсивными в 8:25 UT. После 8:26 UT появился радиовсплеск II типа. Его две гармоники наблюдались после 8:27 UT, однако выражен он был не очень отчетливо, что часто присуще лимбовым событиям. Мощное микроволновое излучение в 8:27 UT протягивается, как видно из этого рисунка, до корональных высот.

Итак, вспышка 23 октября 2003 г. демонстрирует обычные особенности мощных событий. Первичное энерговыделение, возникшее около 8:25 UT, проявилось затем, вероятно, и в другом конце корональной петли около 8:27 UT. Эта импульсная стадия была достаточно мощной и наблюдалась вплоть до энергий фотонов, превосходящих 300 кэВ. Достаточно жесткое рентгеновское излучение 50–100 кэВ наблюдалось в основаниях вспышечных петель в течение всей импульсной стадии (рис. 4). Микроволновой всплеск был достаточно мощным и на частоте 1.54 ГГц достиг 10 000 с.е.п.

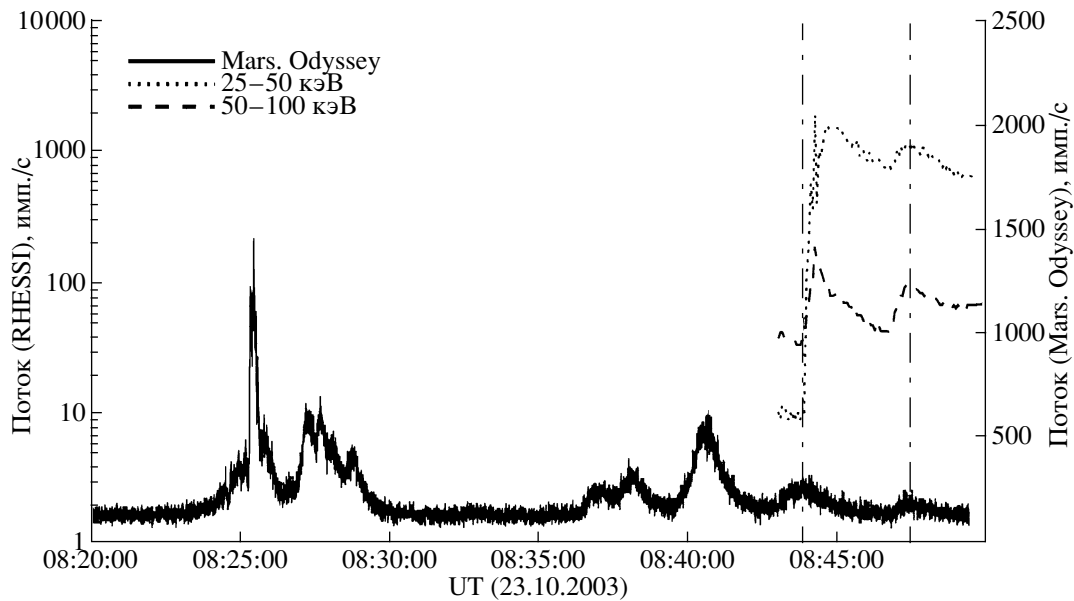


Рис. 3. Регистрация вспышки 23 октября 2003 г. по данным КА “Mars Odyssey” и RHESSI. Временное разрешение — 0.25 с. Время — земное.

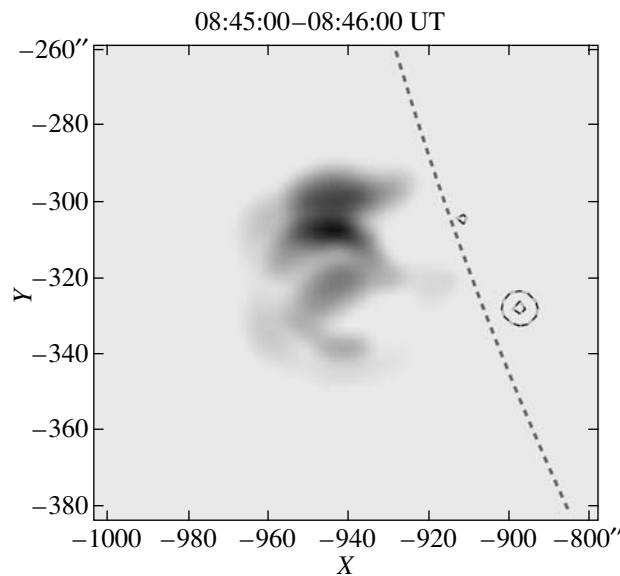


Рис. 4. Изображение вспышки (в гелиографических координатах) 23 октября 2003 г. по наблюдениям на RHESSI за лимбом в диапазоне 12–25 кэВ. Изолинии на диске — излучение в диапазоне 50–100 кэВ на уровне 50% и 90% от максимального уровня.

Второй максимум рентгеновского излучения около 8:40 UT привел к последующему развитию постэруптивных арочных систем. Эти арки поднялись до значительных высот, причем можно было выделить три арочные системы, оси которых были направлены под значительными углами одна от другой. В дальнейшем этот процесс распростра-

нился над значительной частью восточного лимба и далее к группе 484 [10].

Аналогичная картина наблюдалась и во вспышке 24 октября (после 2:27 UT) балла M7.6, которая полностью наблюдалась на КА “Mars Odyssey”, RHESSI и КОРОНАС-Ф. Временные профили были очень похожи на всех трех аппаратах с диф-

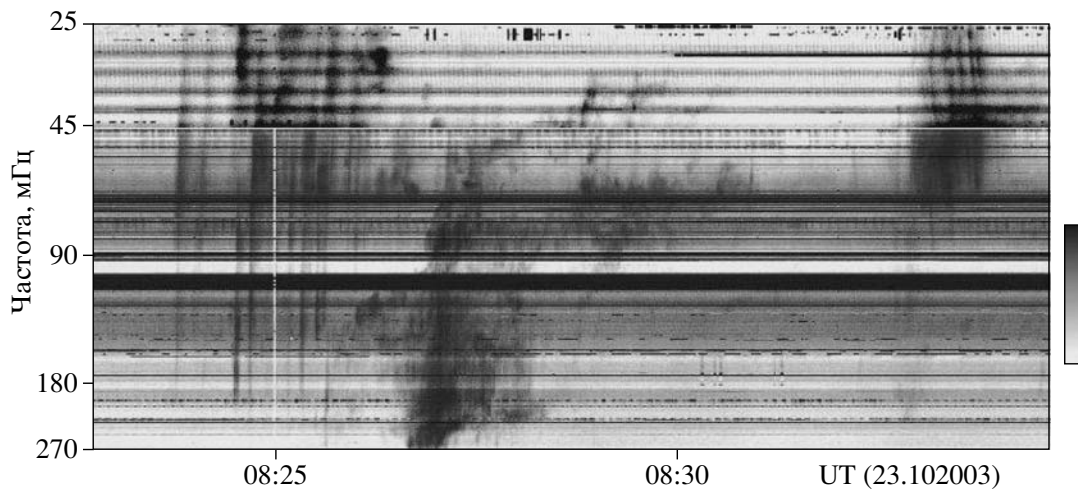


Рис. 5. Спектр метрового радиоизлучения по наблюдениям ИЗМИРАН 23 октября 2003 г. Кроме радиовсплесков III типа около 8:25 UT и начала всплесков II и IV типов в 8:27 UT, обращает на себя внимание на усиление метрового излучения в 8:33 UT.

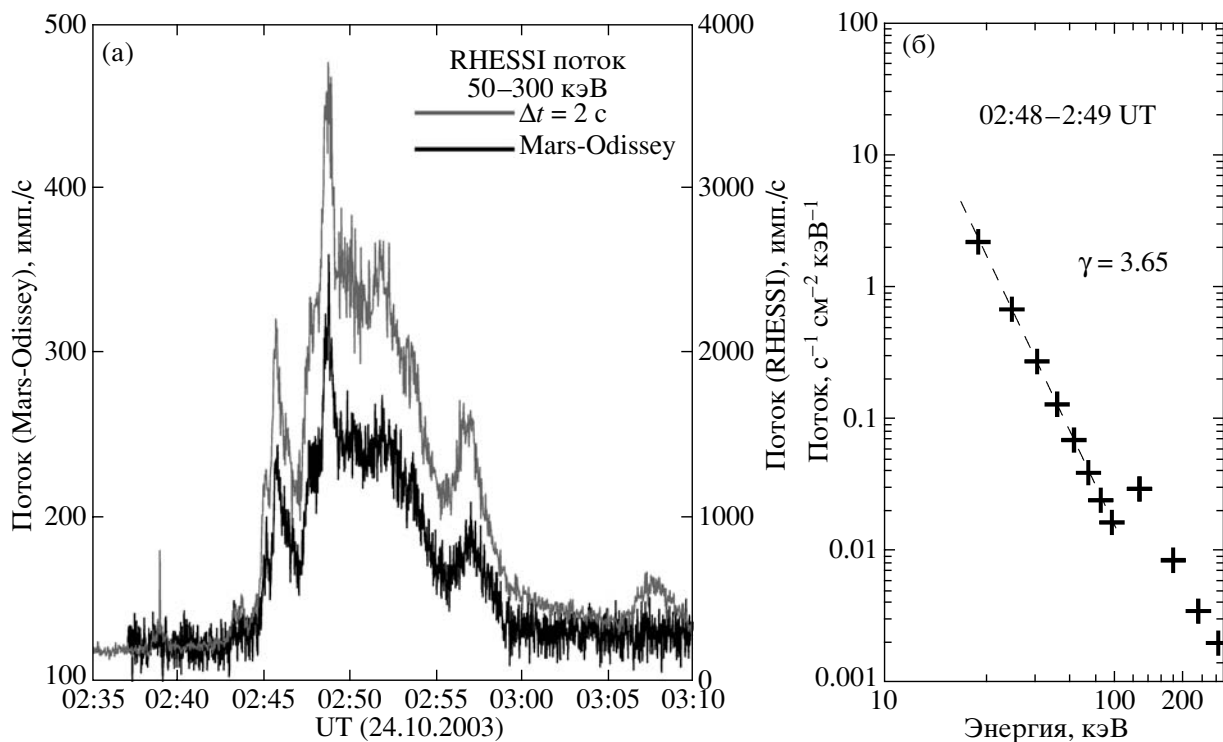


Рис. 6. Слева — профили рентгеновского всплеска 24 октября 2003 г. по данным “Mars Odyssey” и RHESSI. Временное разрешение — 0.25 с. Время — земное. Справа — спектр всплеска 24 октября 2003 г. по данным RHESSI.

ференциальным степенным спектром, показатель которого в области свыше 20 кэВ был равен -3.86 (рис. 6).

Чтобы не возвращаться далее к импульсной стадии всплеска, заметим, что уже во всплеске 21 октября наблюдалось характерное изменение

жесткости спектра. Всплеск, обозначенный 1 на рис. 2а, был мягким, затем (номер 2) — жестким и излучение оставалось достаточно жестким на заключительной стадии всплеска. Это — известный сценарий развития нетеплового излучения (“soft-hard-harder”). Интересное описание спектра

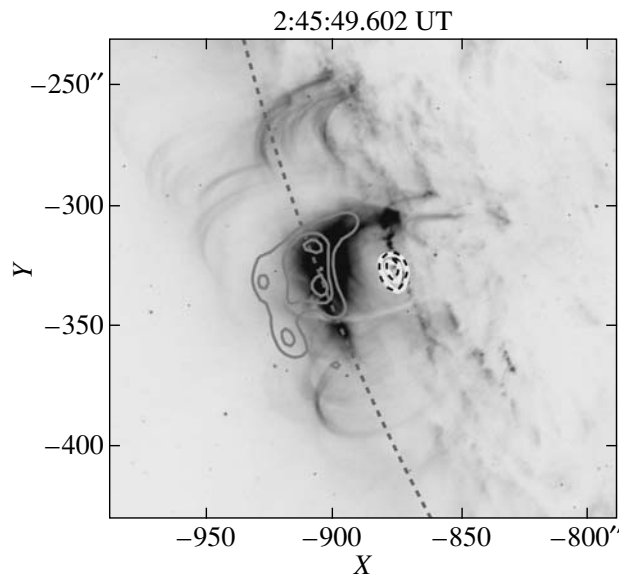


Рис. 7. Изображение вспышки 24 октября 2003 г. Фон — наблюдения TRACE в диапазоне 195 Å. Изолинии — наблюдения RHESSI за лимбом в диапазоне 12–25 кэВ (уровни 10%, 30%, 50% и 90%) и на диске в диапазонах 50–100 кэВ и 100–300 кэВ (штрихи; уровни потока 50% и 90%).

жесткого рентгеновского излучения и гистерезисная диаграмма “жесткость—рентгеновский поток” предложены недавно в [18]. Там этот сценарий обсуждается по наблюдениям RHESSI для мощных вспышек 2004–2005 гг. Для всех трех вспышек 21–24 октября 2003 г. наши данные согласуются со сценарием “soft-hard-harder”, что свидетельствует о значительной доле нетеплового излучения в общем потоке излучения в диапазоне энергий фотонов, превышающих 15–20 кэВ. Отсюда следует, что в начале вспышек в группе 486 нетепловые процессы были отчетливо выражены. Это типично для больших групп с δ -конфигурацией магнитных полей.

Обсуждавшиеся выше системы арок во вспышке 24 октября наблюдались не только на спутнике TRACE в диапазоне 195 Å, но и были видны в диапазоне 12–25 кэВ по наблюдениям спутника RHESSI (рис. 7). Здесь также наблюдались две системы петель — основная южная и более слабая высокая на севере. Однако в отличие от вспышки 23 октября, северная и южная системы были удалены друг от друга гораздо более сильно. Вся система петель в этой вспышке 24 октября оказалась более сложной по сравнению с обычными вспышками с близкой энергетикой.

События 23–24 октября 2003 г. можно рассматривать как один из эпизодов вспышечной активности группы 486, повторяющийся затем с интервалами от 1.5 до 2 сут вплоть до захода этой группы 5 ноября. Уже в этот промежуток времени сложились основные закономерности этой

активности, которые проявились в симпатическом характере явлений. В частности, практически все время нахождения группы на диске наблюдалась тесная связь между явлениями в группах 484 и 486. Выбросы (рис. 8а) практически вдоль параллели от группы 484 к группе 486 инициировали развитие нестационарных процессов в группе 486 через несколько минут после событий в группе 484. В последующие дни эта связь также ощущалась, хотя вспышки в группе 486 “инициировали” явления в группе 484.

Вторым обстоятельством являлось распространение возмущений вдоль нейтральной линии крупномасштабного магнитного поля. В рассмотренных выше вспышках 21, 23 и 24 октября намечалась форма типа сигмоида с образованием трех систем петель. Постепенно угол между осями петель менялся при переходе от одной вспышки к другой, отражая, по-видимому, поведение нейтральной линии крупномасштабного магнитного поля близ центра активности. Вне группы 486 эта структура была подробно изучена [10] по форме диммингов, и она ассоциировалась авторами цитированной работы с “узкой дугой с длиной, сопоставимой с диаметром диска, и обращенной выпуклостью в сторону высоких широт южной полусферы”. Она показана нами на рис. 8б (1–2–3–4) для 25 октября вместе с информацией о крупномасштабном магнитном поле. Эта структура, которая существовала вне вспышек и сохранялась вплоть до захода группы, частично продолжала существовать даже в следующем обороте с высокой вспышечной активностью.

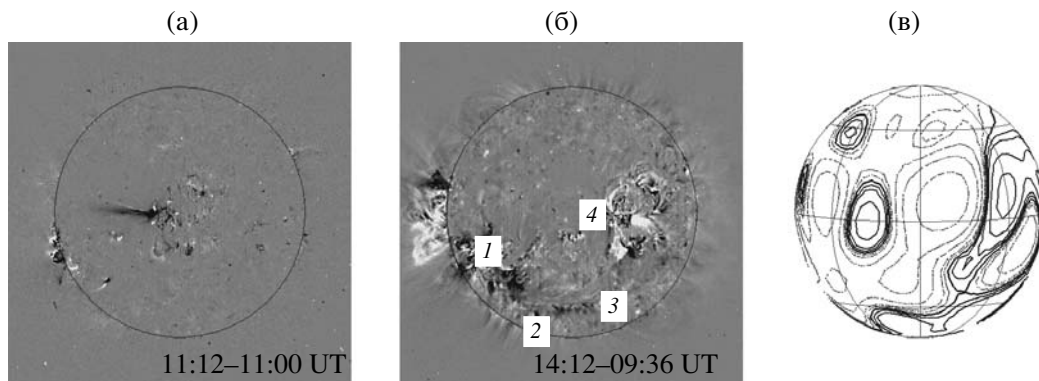


Рис. 8. (а) — Выброс 23 октября 2003 г.; разностное изображение двух соседних кадров SOHO/EIT в диапазоне 195 Å. (б) — Разностное изображение 25 октября 2003 г., указано положение канала диммингов 1–2–3–4. (в) — Распределение крупномасштабных магнитных полей на расстоянии 1.1 радиуса от центра Солнца 25 октября 2003 г. Группа 486 имела координаты S15, E43, группа 484 — N05, W13.

6. ВЫВОДЫ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Наряду с наземными наблюдениями Солнца, внеатмосферные исследования последнего десятилетия обеспечили получение качественно нового наблюдательного материала, относящегося к нестационарным процессам и центрам активности, в которых они развиваются. Наиболее важным здесь является получение изображений вспышек, активно начатое еще на спутнике Yohkoh и продолженное на SOHO в течение всего XXIII цикла. На КА TRACE изображения получались уже с высоким временным и пространственным разрешением, а на RHESSI — в широком диапазоне энергий, включающим гамма-диапазон. Эпизодическая работа по наблюдениям некоторых явлений на невидимой с Земли стороне Солнца стала сейчас регулярной благодаря запуску КА STEREO.

Вспышечная активность Солнца в октябре, а затем и в ноябре 2003 г. была экстремально высокой. Ее анализу посвящена обширная литература. Мы решили дополнить эти результаты, рассмотрев самое начало развития основной группы 486. Здесь нам помогло то, что аппаратура HEND, разработанная в ИКИ РАН и установленная на КА “Mars Odyssey”, регистрировала жесткое излучение явлений в этой группе примерно за 2 сут до появления группы на восточном лимбе, наблюдаемом с Земли. Эти данные, вместе с регистрациями на околоземных орбитах, позволили восстановить характер развития группы. Серия небольших узких СМЕ во второй половине 21 октября, быстрая вспышка около 19^h в тот же день, еще не видимая с Земли, и серия слабых лимбовых вспышек 22 октября позволяли прийти к заключению о том, что группа

приближается к достижению обычного максимума вспышечной активности достаточно больших групп.

Для явлений на лимбе очень трудно наблюдать развитие магнитных полей и движений в фотосфере центра активности. Поэтому при прогнозировании приходится использовать в основном информацию собственно о нестационарных процессах на лимбе. Как показал анализ, проведенный уже в этой статье, два обстоятельства могли оказаться здесь существенными. Первое из них относилось к достаточно большой жесткости изученных трех вспышек 21, 23 и 24 октября. Соответствующие жесткие рентгеновские всплески развивались по одному сценарию — “soft-hard-harder”, вспышка 23 октября была зарегистрирована КА “Mars Odyssey” в области энергий свыше 300 кэВ и характеризовалась большим потоком в микроволновом диапазоне. После 22 октября характер СМЕ изменился: после вспышек 23 и 24 октября наблюдались уже быстрые выбросы с массой, превосходящей 10^{16} г, типа частичного гало. Это свидетельствовало о достаточно мощном процессе первичного энерговыделения в восходящей группе, что обычно характерно для процесса усложнения там локальных магнитных полей.

Существовало, однако, и второе обстоятельство, способное усилить активность этой группы. Несмотря на то, что вспышки 21–24 октября были достаточно быстрыми, в них отчетливо проявлялись постэруптивные явления. Это начало проявляться уже в лимбовых вспышках 22 октября, наблюдаемых в диапазоне 195 Å на SOHO, а затем по наличию соответствующего радиоизлучения на длине волны 10 см после 9:00 во вспышке 23 октября и во вспышке 24 октября согласно фильму TRACE в диапазоне 195 Å. Имеются все основания

считать, что события 23 и 24 октября при наблюдениях на диске были бы аналогичны сигмоидным вспышкам с распространением процессов уже вне центра активности вдоль нейтральной линии крупномасштабного магнитного поля.

Уже в работе [10] по поведению диммингов было продемонстрировано распространение нестационарных процессов вдоль нейтральной линии крупномасштабного поля, проходящей через группы 486 и 484. Это подтверждается и в нашей работе, как по поведению вспышечных петель, так и по рассмотрению выбросов и последовательности начала развития нестационарных явлений в обеих группах. Таким образом, есть основания предполагать, что оба обстоятельства — усложнение локальных магнитных полей и взаимодействие удаленных центров активности, располагающихся на больших расстояниях на одной и той же нейтральной линии крупномасштабного магнитного поля, — могут совместно привести к периоду экстремально высокой вспышечной активности. В нашей статье показано, что предпосылки для такого развития вспышечной активности возникли уже в самом начале развития группы 486.

Можно высказать некоторые соображения о физических причинах такого мощного усиления вспышечной активности группы 486. Работа [9] еще раз уже количественно продемонстрировала, что возникновение мощных вспышек связано с накоплением над фотосферным центром активности энергии непоненциальной составляющей магнитного поля. Соответствующие токи в корональных слоях возникают, вероятнее всего, в результате сдвиговых движений (шира). Связь этих токов с шировыми движениями для явлений 25–28 октября 2003 г. также продемонстрирована в работе [9]. Наличие высокой завихренности и аномально большой спиральности поля скоростей на глубине около 7 тыс. км под группой 486 было обнаружено Томпсоном [1] по гелиосейсмологическим данным. Центры с необычайно высокой вспышечной активностью, как правило, характеризуются появлением в непосредственной близости от них групп-саттелитов, движущихся в противоположных направлениях по разные стороны от нейтральной линии магнитного поля. В некоторых, весьма редких случаях прямо на фотосферном уровне наблюдается вихревое движение вокруг основного пятна [6, 16]. В анализируемом нами случае огромный вихрь, проявившийся на больших глубинах, возник, по-видимому, из-за медленной эволюции крупномасштабного магнитного поля. В наблюдениях на это указывает изменение в октябре 2003 г. формы канала [10], вероятно, отражающего нейтральную линию крупномасштабного магнитного поля. Отметим, что постэруптивные явления в мощных вспышках октября 2003 г. становились

все более выраженными по сравнению с проанализированными здесь событиями начала развития группы 486.

Разумеется, информация о явлениях за восточным лимбом является чрезвычайно полезной при прогнозировании космической погоды. Надеемся, что КА STEREO будет работать и тогда, когда солнечная активность станет существенно выше и продемонстрирует все преимущества таких наблюдений.

Авторы благодарят коллективы SOHO/EIT и SOHO/LASCO проекта SOHO (SOHO — проект международного сотрудничества ESA и NASA) за данные, использованные при анализе, коллективы проектов GOES, TRACE, RHESSI, предоставившие наблюдательные данные для открытого доступа. Мы благодарны И.Г. Митрофанову за предоставленную возможность использования некоторых данных прибора HEND и коллектив, обеспечивший работу проекта КОРОНАС-Ф, в частности, сотрудников НИИЯФ МГУ. Мы признательны И.М. Чертоку за большую помощь в выполнении этой работы. Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (коды проектов 08-02-00872, 05-07-90209, 06-02-16239 и 07-02-00101), Программой государственной поддержки ведущих научных школ РФ (грант НШ-4573.2008.2), программой фундаментальных исследований Президиума РАН “Солнечная активность и физические процессы в системе Солнце–Земля”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. M. Thomson, in: *The Dynamic Sun: Challenges for Theory and Observations*, Proc. 11-th Europ. Solar Phys. Meeting, eds D. Danesy, S. Poedts, A. De Groof, J. Andries, ESA SP-600, CD-ROM (2005).
2. В. М. Григорьев, Л. В. Ермакова, Иссл. геомагн., аэрон. и физ. Солнца, вып. 76, 25 (1986).
3. О. В. Чумак, Х.-К. Цанг, Астрон. журн. **82**, 847 (2005).
4. М. А. Лившиц, В. А. Чернетский, И. Г. Митрофанов и др., Астрон. журн. **82**, 1025 (2005).
5. М. А. Лившиц, О. Г. Бадалян, Астрон. журн. **81**, 1138 (2004).
6. D. S. Brown, R. W. Nightingale, D. Alexander, *et al.*, Solar Phys. **216**, 79 (2003).
7. В.Н. Боровик, В.Е. Абрамов-Максимов, И.Ю. Григорьева и др., в сб.: *Физическая природа солнечной активности и прогнозирование ее геофизических проявлений*, Тр. XI Пулковской междунар. конф. по физике Солнца, ГАО РАН, Пулково, Санкт-Петербург (С.-Пб.: ГАО РАН, 2007), с. 67.
8. N. Gopalswamy, L. Barbieri, E. W. Cliver, *et al.*, J. Geophys. Res. **110**, A09S00, doi:10.1029/2005JA011268 (2005).

9. О. В. Чумак, Х.-К. Цанг, Ж. Гуо. *Астрон. журн.* **85**, 946 (2008).
10. И. М. Черток, В. В. Гречнев. *Астрон. журн.* **82**, 180 (2005).
11. I. M. Chertok and V. V. Grechnev, *Solar Phys.* **229**, 95 (2005).
12. М. А. Лившиц, В. А. Чернетский, А. В. Богомолов и др., *Астрон. вестн.* **40**, 171 (2006).
13. R. P. Lin, B. R. Dennis, G. J. Harford, *et al.*, *Solar Phys.* **210**, 3 (2002).
14. D. M. Smith, R. P. Lin, P. Turin, *et al.*, *Solar Phys.* **210**, 33 (2002).
15. R. C. Puetter and R. K. Pina, *Experim. Astron.* **3**, 293 (1994).
16. R. A. Schwartz, A. Csillaghy, A. K. Tolbert, *et al.*, *Solar Phys.* **210**, 165 (2002).
17. L. Maltagliati and A. Falchi, *Solar Phys.* **235**, 125 (2006).
18. P. C. Grigis and A. O. Benz, *Astron. and Astrophys.* (2007, в печати); e-Print arXiv:0708.2472v1 [astro-ph] (2007).

Eruptive Processes at the Beginning of Development of Powerful Flare-Active Regions on the Sun

L. K. Kashapova and M. A. Livshits

The evolution of large solar activity centers is studied, and the conditions resulting in powerful nonstationary processes are clarified. In addition to the factors that are usually considered (changes in sunspot area, the structure of magnetic fields, the character of motions), we examine to what extent observations of nonstationary processes (flares and associated coronal mass ejections) can be used to predict the development of such processes in the subsequent evolution of the activity center. We considered the example of a powerful group in October 2003, which could be observed before its appearance at the eastern limb using a spacecraft in near-Mars orbit. We plotted for events occurring in 2003 images of flares in various spectral ranges and analyzed high-energy processes in group 10486, which was isolated at the beginning of its development, and then in the interrelated groups 10486 and 10484. The analysis of the peculiar early development of group 10486 suggested that an intensification of the activity could be expected due to the emergence of new magnetic flux (and satellite groups), as well as the interaction and synchronization of two and then three large groups of the end of October 2003. In other words, in this case, extremely powerful nonstationary processes are associated with a relatively higher contribution of large-scale magnetic fields. We compare our results to analyses of motions and magnetic fields in this activity center throughout its transit across the disk from October 23 to November 5, 2003.