

УДК 523.945

МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКИ. 2. МОДЕЛЬ ВСПЫШКИ И МОДЕЛИРОВАНИЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАГНИТНЫХ КАРТ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ

© 2012 г. А. И. Подгорный¹, И. М. Подгорный²

¹Учреждение РАН Физический институт им. П.Н. Лебедева, г. Москва,

²Учреждение РАН Институт Астрономии, г. Москва

e-mail: podgorny@inasan.ru

Поступила в редакцию 06.07.2010 г.

После доработки 11.06.2011 г.

Использование результатов численного трехмерного МГД моделирования и данных, полученных на специализированных космических аппаратах, позволило построить электродинамическую модель солнечной вспышки. Вспышка происходит в результате взрывного магнитного пересоединения в токовом слое над активной областью, а ускоренные в продольных токах электроны вызывают жесткое рентгеновское излучение на поверхности Солнца. В представленном обзоре рассмотрены работы, в которых для моделирования образования токового слоя граничные и начальные условия на фотосфере задавались непосредственно из магнитных карт, снятых на аппарате SOHO MDI в предвспышечном состоянии. Численное решение полной системы МГД уравнений, выполненное с помощью программы ПЕРЕСВЕТ нового поколения показало образование нескольких токовых слоев перед серией вспышек. Сравнение результатов наблюдения спектров релятивистских протонов и моделирования их ускорения вдоль особой линии магнитного поля позволило оценить скорость магнитного пересоединения во вспышке $\sim 10^7$ см/с. Крупные вспышки (класса X) возникают после возрастания магнитного потока активной области до 10^{22} Мкс.

ВВЕДЕНИЕ

Солнечная вспышка характеризуется нагреванием плазмы до температуры ~ 3 кэВ и ускорением электронов до энергии ~ 100 кэВ, когда наиболее представительным для диагностики плазмы является рентгеновский диапазон спектра. Долгое время измерения проводились только аппаратурой, расположенной на поверхности Земли, которая не позволяет регистрировать излучение в рентгеновской области спектра из-за сильного поглощения рентгеновских лучей в атмосфере. Измерения в видимом свете давали информацию о процессах на поверхности Солнца. Поэтому существовал соблазн считать вспышку сугубо хромосферным явлением. Однако ряд исследователей [Dungey, 1958; Сыроватский, 1966] выдвигали гипотезы о выделении энергии вспышки в короне. Дело в том, что в короне плотность магнитной энергии значительно превышает плотность энергии плазмы, запас магнитной энергии может при определенных условиях перейти в тепло и кинетическую энергию. Однако в момент вспышки при выделении энергии со скоростью более 10^{30} эрг/с распределение поля на фотосфере практически не меняется. Это значит, что энергия потенциального магнитного поля, т.е. энергия поля фотосферных источников, не реализуется при вспышке. Источником энергии вспышечного процесса может

быть только магнитная энергия токов в короне над активной областью. Токовая система в короне должна обладать способностью аккумулировать энергию за счет медленного изменения поля фотосферных источников, а затем перейти в неустойчивое состояние и выделить энергию взрывным образом, вызвав вспышку. Такой токовой системой может быть токовый слой, диссипация энергии которого происходит из-за магнитного пересоединения.

В серии работ, изложенных в обзоре [Подгорный и Подгорный, 2012], показано образование устойчиво существующего токового слоя, в магнитном поле которого аккумулируется энергия. Численно решалась полная система трехмерных магнитогидродинамических (МГД) уравнений. Было показано образование токового слоя над активной областью за два-три дня перед вспышкой. Важной особенностью вспышечного токового слоя является нормальная компонента магнитного поля, в отличие от часто теоретически рассматриваемого нейтрального токового слоя. В результате эволюции токовый слой может перейти в неустойчивое состояние и происходит вспышка.

Типичными проявлениями солнечной вспышки являются: (1) тепловое рентгеновское излучение из короны, (2) жесткое тормозное рентгеновское

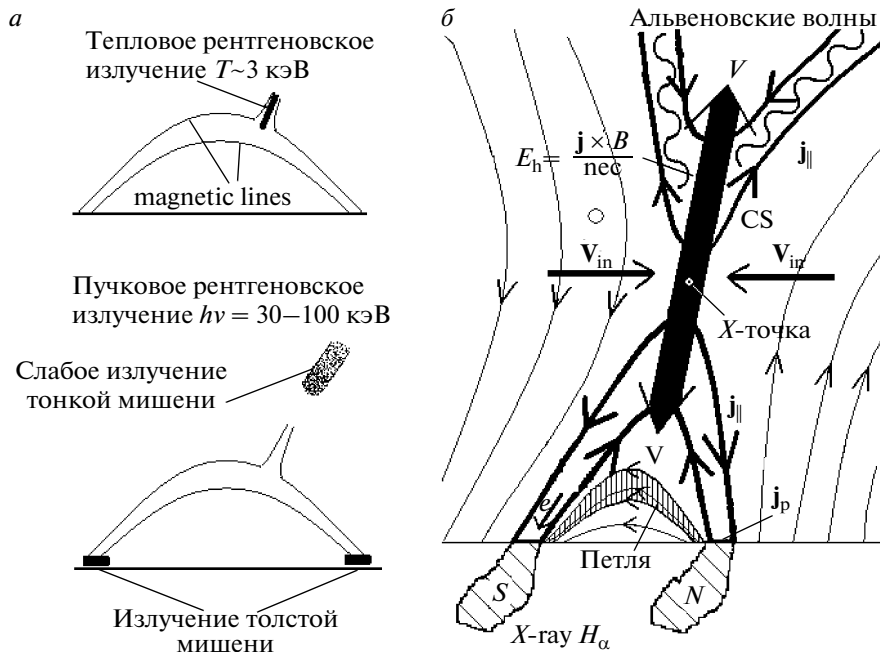


Рис. 1. Схема расположения источников жесткого рентгеновского излучения вспышки относительно магнитной петли по данным работы [Lin, 2003] (а). Электродинамическая модель вспышки (б). Тонкими линиями и стрелками показаны линии магнитного поля. Жирными линиями и стрелками показаны продольные токи.

излучение из хромосферы Солнца, (3) радиоизлучение горячей плазмы, (4) эжекция корональной массы в межпланетное пространство и (5) солнечные космические лучи. Каждая элементарная вспышка сугубо индивидуальна. Не все вспышечные явления всегда проявляются одинаково. Некоторые из вспышечных эффектов в отдельных вспышках не наблюдаются. Отсутствие точно повторяющегося сценария развития вспышки делает необходимым моделировать конкретное вспышечное явление, используя результаты наблюдения в предвспышечном состоянии для конкретной вспышки. Модель вспышки должна объяснять возможность возникновения основных наблюдаемых эффектов и находиться в согласии с результатами численного моделирования.

В численных МГД расчетах конкретных вспышек для задания начальных и граничных условий долгое время использовалась аппроксимация поля активной области точечными источниками поля. Использование для аппроксимации магнитных диполей позволило продемонстрировать появление токового слоя в короне над активной областью при всплывании нового магнитного потока, поле которого направлено противоположно уже существующему полю над активной областью. В магнитном поле токового слоя происходит медленное (2–3 суток) накопление энергии равное энергии вспышки. Было продемонстрировано ускорение плазмы вдоль слоя электродинамическими силами, приводящее к выбросу ко-

рональной плазмы. Все эти результаты получены без использования каких-либо предположений о механизме вспышки. Однако для точного количественного моделирования наблюдаемых явлений аппроксимация фотосферными точечными источниками явно не достаточна. Распределение поля в отдельных пятнах очень сложно, и рассеянный между отдельными пятнами магнитный поток может существенно повлиять на конфигурацию поля в короне над активной областью. Разработанное новое поколение программы ПЕРЕСВЕТ [Подгорный и Подгорный, 2012], позволяет использовать для постановки начальных и граничных условий карты измеренного на фотосфере магнитного поля. В настоящей работе представлена электродинамическая модель вспышки, построенная на основании данных трехмерного МГД моделирования и результатов наблюдений появления серии вспышек над данной активной областью, рассматривается механизм генерации солнечных космических лучей, и анализируется связь магнитного потока активной области с появлением больших вспышек.

2. МОДЕЛЬ ВСПЫШКИ

Электродинамическая модель солнечной вспышки [Podgorny and Podgorny, 1992; Подгорный и Подгорный, 2001; 2006], изображенная на рис. 1, построена на основании трехмерного численного МГД моделирования и сравнения резуль-

татов моделирования с наблюдениями. Модель объясняет все основные наблюдательные данные. Главным элементом модели является токовый слой. Слой разделяет линии магнитного поля противоположного направления. Плазма втекает в слой с обеих его сторон вместе с вмороженными линиями магнитного поля. Эти линии могут сливаться в окрестности особой X -линии, образуя новый топологический класс линий в слое. Такой процесс получил название пересоединения. Пересоединение вызывает диссипацию магнитной энергии, запасенной в поле токового слоя, и ее переход в энергию плазмы. Нагревание плазмы за счет быстрого магнитного пересоединения при распаде токового слоя обеспечивает высокую температуру над магнитными петлями, а, следовательно, возникновение там теплового рентгеновского излучения в короне, впервые зарегистрированного на аппаратах *Yohkoh* и *RHESSI* [Hiei, 1996; Lin, 2003; Masuda, 1994] (рис. 1а). После пересоединения линий магнитного поля втекающая в токовый слой плазма ускоряется вдоль токового слоя вверх и вниз (рис. 1б). Магнитные поля токовых систем, не содержащих особых X -линий, не могут быстро диссипировать, даже при искусственном разрыве тока, т. к. вмороженное в плазму короны магнитное поле не может при этом быстро исчезнуть [Подгорный и др., 2010].

В отличие от нейтрального токового слоя Харриса, этот токовый слой содержит нормальную компоненту магнитного поля. Сила $\mathbf{j} \times \mathbf{B}/c$ ускоряет плазму, и поток плазмы вверх приводит к эжекции солнечного вещества в межпланетное пространство — возникает корональный выброс. Вопрос о связи вспышки и коронального выброса долгое время широко дискутировался. Существование такой связи, предсказанной электродинамической моделью, было окончательно установлено в работах Драера [Drueg, 1996]. Плазма, эжектированная вниз, растекается вдоль линий магнитного поля, образуя под токовым слоем петли с повышенной концентрацией плазмы. Накопление новых линий магнитного поля создает впечатление расширяющейся петли (Svestka et al., 1997). Захваченные магнитным полем частицы приобретают в петле дополнительную энергию вследствие сохранения адиабатического инварианта (Somov and Kosugi, 1998). Горячие светящиеся петли появляются во время вспышки. Следует подчеркнуть, что в светящейся петле плазма вытесняет магнитное поле, и поперек поля устанавливается баланс давлений, т. е. **светящаяся петля является диамагнитным образованием.**

Важной особенностью корональных токовых слоев является проявление эффекта Холла. Генерация в слое электрического поля Холла E_h , на-

правленного вдоль слоя, и тока Холла j_h описывается законом Ома для двухкомпонентной плазмы:

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{j}}{\sigma} - \frac{\mathbf{V} \times \mathbf{B}}{c} + \frac{\mathbf{j} \times \mathbf{B}}{nec} - \frac{\nabla(nT_e)}{en}. \quad (1)$$

Для длинного токового слоя последний член в уравнении (1) мал, и им можно пренебречь, и компонента уравнения (1) вдоль слоя имеет вид $E_h = j_h/\sigma + j_{cs}B_n/nec$. Здесь j_{cs} — плотность тока в слое.

Имеется ряд данных, свидетельствующих о том, что, благодаря высокой проводимости, член j_h/σ в токовых слоях в космической и лабораторной плазме мал [Minami et al., 1993; Podgorny et al., 1988], а член E_h в уравнении играет принципиальную роль в физике токовых слоев. Электрическое поле Холла можно оценить, как:

$$E_h \sim \frac{j_{cs}B_n}{nec} = V_{cur}B_n/c. \quad (2)$$

Здесь V_{cur} — токовая скорость.

Вследствие высокой анизотропии проводимости плазмы в магнитном поле короны, поле Холла генерирует в короне продольные электрические токи, т. е. токи, направленные вдоль линий магнитного поля, пересекающих токовый слой. Продольные токи и их направления показаны на рис. 1б жирными линиями. Продольные токи, генерируемые полем Холла ниже X -линии, замыкаются в хромосфере токами Педерсена, текущими поперек магнитного поля. Проводимость Педерсена обеспечивается столкновениями заряженных частиц с нейтральными атомами.

Источники жесткого рентгеновского излучения с энергией превышающей 100 кэВ и вспышечные ленты располагаются на поверхности Солнца в подножьях диамагнитных петель под токовым слоем. Они вызваны торможением в хромосфере пучков электронов, ускоренных вдоль линий сильного магнитного поля в направленном вверх продольном токе. Поверхностные источники обладают степенным спектром, типичным для торможения электронов в толстой мишени. Процесс генерации свечения здесь аналогичен механизму, вызывающему полярные сияния [Podgorny et al., 1988], но энергия электронов, ускоренных в магнитосфере Земли, значительно меньше. По-видимому, электрическое поле в продольном токе распределено не равномерно, а сосредоточено в локальных разрывах потенциала (двойных электрических слоях), как это имеет место в полярном овале магнитосферы Земли. В типичном случае энергия электронов, высыпавшихся на поверхность Солнца при вспышке, может превзойти 100 кэВ. Высыпание электронов приводит к локальному разогреву и испарению хромосферы. Поток ионизованного испаренного вещества является дополнитель-

ным источником, заполняющим магнитную арку плазмой.

Измерения, выполненные на аппарате RHESSI [Lin, 2003; Krucker et al., 2008a] (рис. 1a), показали, что помимо расположенных в основаниях петли источников жесткого рентгеновского излучения имеется также мощный источник теплового рентгеновского излучения из короны. Тепловой источник отчетливо регистрируется при наблюдении вспышки на лимбе в том месте, где должен образоваться токовый слой. Этот компактный вспышечный рентгеновский источник излучает тепловой спектр из плазмы концентрации $\sim 10^{11} \text{ см}^{-3}$ при температуре $\sim 3 \text{ кэВ}$. Полное число частиц в корональном источнике превосходит 10^{38} , что хорошо совпадает с массой коронального выброса. Этот факт можно рассматривать как прямое подтверждение генерации коронального выброса из-за ускорения плазмы в токовом слое.

При взрывном распаде токового слоя его толщина уменьшается, а плотность тока в слое резко возрастает и вместе с ней возрастает поле Холла. Создаются идеальные условия для генерации альвеновской волны, распространяющейся в короне вдоль линий магнитного поля, которые пересекают токовый слой выше X-линии (на рис. 1 выше X-точки) и уходят в межпланетное пространство. Продольные токи противоположного направления в альвеновской волне, генерируемые выше X-линии полем Холла, распространяются вдоль линий магнитного поля со скоростью волны. Замыкание этих продольных токов в расширяющейся плазме короны происходит токами смещения, а роль проводимости играет альвенов-

ская проводимость $\Sigma_A = \frac{c^2}{4\pi V_A}$. Механизм генерации альвеновской волны, возникающей при движении сгустка плазмы поперек магнитного поля в плазме, подробно анализировался в работе [Haegendel, 1990] и продемонстрирован в численных расчетах [Подгорный и Подгорный, 1997a]. В таком случае причиной волны является электрическое поле Лоренца. В распадающемся токовом слое должен действовать аналогичный механизм, но с участием поля Холла, т. к. магнитное поле встроено в электронную компоненту плазмы. Альвеновская волна возникает из-за возмущения магнитного поля движением электронного газа в токовом слое.

Ускоренные в продольных токах, генерируемых полем Холла, электроны распространяются в межпланетном пространстве, достигая орбиты Земли. Взаимодействие быстрых электронов с межпланетной плазмой вызывает излучение на плазменной частоте (радиоизлучение III-типа) и жесткое рентгеновское излучение [Krucker et al.,

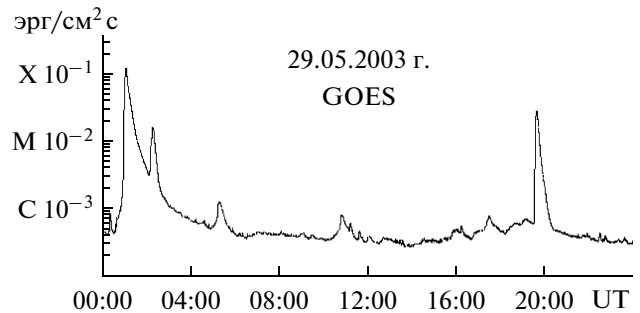


Рис. 2. Импульсы рентгеновского излучения с энергией $\sim 10 \text{ кэВ}$, зарегистрированные аппаратом GOES 29 мая 2003 г над активной областью АО 10365.

2008b]. Низкая плотность плазмы в короне не может приводить к значительному торможению потока ускоренных электронов, поэтому спектр создаваемого ими рентгеновского излучения соответствует излучению из тонкой мишени [Подгорный и др., 2010].

Аналог радиоизлучения III-типа должен возбуждаться и ускоренными пучками электронов, высыпавшимися в плотные слои нижней атмосферы Солнца. Вспышечное радио излучение на частоте 400 ГГц зарегистрировано [Kaufmann et al., 2009] из области сильного магнитного поля (2000 Гаусс , ларморовская частота $\sim 5 \text{ ГГц}$) там, где находится источник жесткого рентгеновского спектра. Это излучение соответствует плазменной частоте при концентрации $\sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

3. МНОГОКРАТНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ ТОКОВЫХ СЛОЕВ

Во всех численных экспериментах, демонстрирующих аккумуляцию энергии в магнитном поле токового слоя, рассматривалась отдельная элементарная вспышка. Исключением являются работы [Подгорный и Подгорный, 2008; Podgorny et al., 2009], в которых показано образование и одновременное существование нескольких токовых слоев над активной областью. Проблема образования нескольких токовых слоев над одной областью возникла в связи с тем, что обычно наблюдается ситуация, когда при перемещении по диску активной области над ней последовательно регистрируется несколько вспышек. Пример появления двух мощных вспышек, зарегистрированных аппаратом GOES с интервалом менее суток над одной активной областью (АО 10365), представлен на рис. 2. Возникает вопрос, генерируются ли эти элементарные вспышки при нескольких последовательных актах частичной диссипации энергии одного и того же токового слоя. Другая возможность состоит в образовании нескольких слоев над сложной активной областью, каждый из которых может вызвать вспышку.

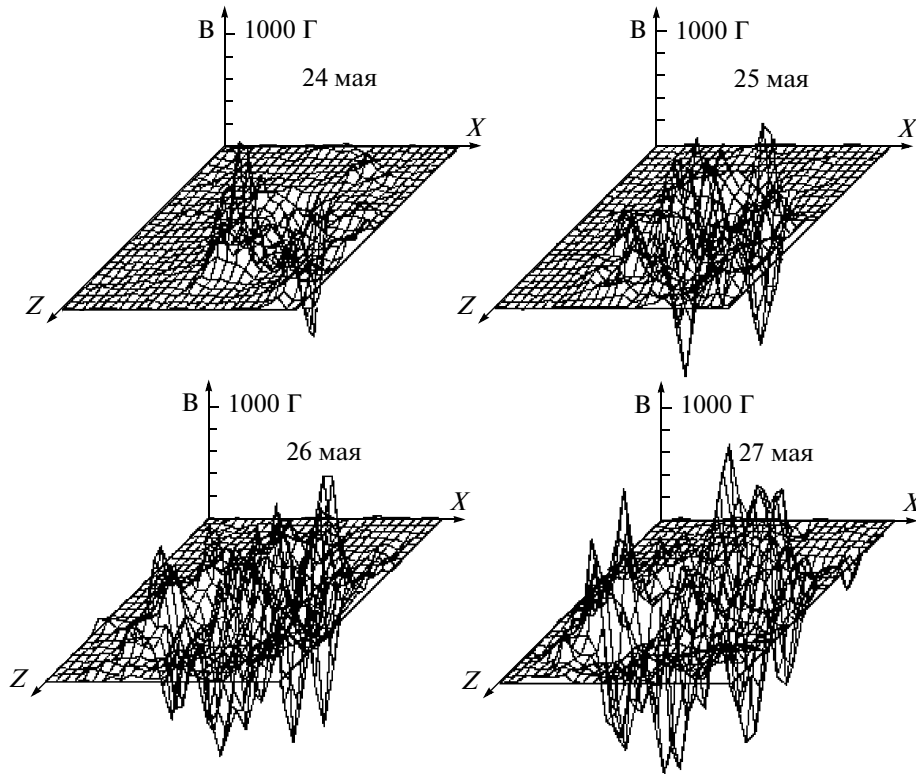


Рис. 3. Распределения нормальной составляющей фотосферного магнитного поля в предвспышечном состоянии активной области АО 10365 размером $1.6 \times 10^{10} \times 1.6 \times 10^{10}$ см. Магнитное поле имеет сложную многополярную структуру.

Медленное изменение распределения магнитного поля в активной области АО 10365 началось за два дня до начала серии вспышек 26–28 мая 2003 г. Согласно каталогу (http://www.lmsal.com/cgi-diapason/get_gev.sh) были зарегистрированы следующие вспышки: 26 мая – M1.9 (05:34); C1.0 (11:24); C5.9 (15:03); M1.0 (16:22); C7.4 (17:02); 27 мая – M1.4 (02:43); C8.9 (03:038); M1.6 (05:06); C6.5 (14:48); X1.3 (22:56); и 28 мая X3.6 (00:17); C7.6 (04:43). В качестве начального магнитного поля в короне взято потенциальное магнитное поле, вычисленное для момента времени 24.05.2003 г. 20:47:59. Для этой цели использовалась карта компоненты магнитного поля, направленной вдоль луча зрения, B_{lsight} на фотосфере, полученная на SOHO MDI. Распределение нормальной составляющей в активной области для интервала 24–27 мая показаны на рис. 3. 24 мая магнитные потоки северного и южного направлений составляли в активной области соответственно: $\Phi_N = 6.4 \times 10^{21}$ Мкс и $\Phi_S = 5.8 \times 10^{21}$ Мкс, а в течение трех дней 24–27 мая они возросли соответственно до значений $\Phi_N = 1.7 \times 10^{22}$ Мкс и $\Phi_S = 1.6 \times 10^{22}$ Мкс.

Вычисления велись в безразмерных единицах в расчетной области ($0 \leq x \leq 1$, $0 \leq y \leq 0.3$, $0 \leq z \leq 1$). В качестве единицы длины был выбран размер расчетной области $L_0 = 4 \times 10^{10}$ см. Ось Y направ-

лена от Солнца, нормально к фотосфере. Плоскость XZ ($y = 0$) расположена на фотосфере. Ось X направлена с Востока на Запад, а ось Z – с Севера на Юг. Перемещение расчетной области на поверхности Солнца при его вращении показано на рис. 4а и 4г. На этом же рисунке представлены карты распределения фотосферного магнитного поля и линии вычисленного потенциального магнитного поля над активной областью.

Возможности современных компьютеров не позволили провести расчет в реальном времени. При сокращении предвспышечного времени перестройки фотосферного поля до нескольких секунд скорости плазмы остаются ниже альфвеновской и звуковой, и условия для возникновения разрывов не появляются. Это значит, что такое сокращение времени счета не приводит к явному искажению результатов.

Система МГД уравнений с граничными и начальными условиями, заданными из карт фотосферного поля, решалась численно с использованием конечно-разностной схемы, реализованной в программе ПЕРЕСВЕТ [Подгорный и Подгорный, 2004; 2012]. Сетка $135 \times 39 \times 135$ конечно-разностной схемы была выбрана неоднородной. Минимальный пространственный шаг составлял 0.005. Он задавался в области сильного магнитного поля. Вычисления показали, что трехмерная

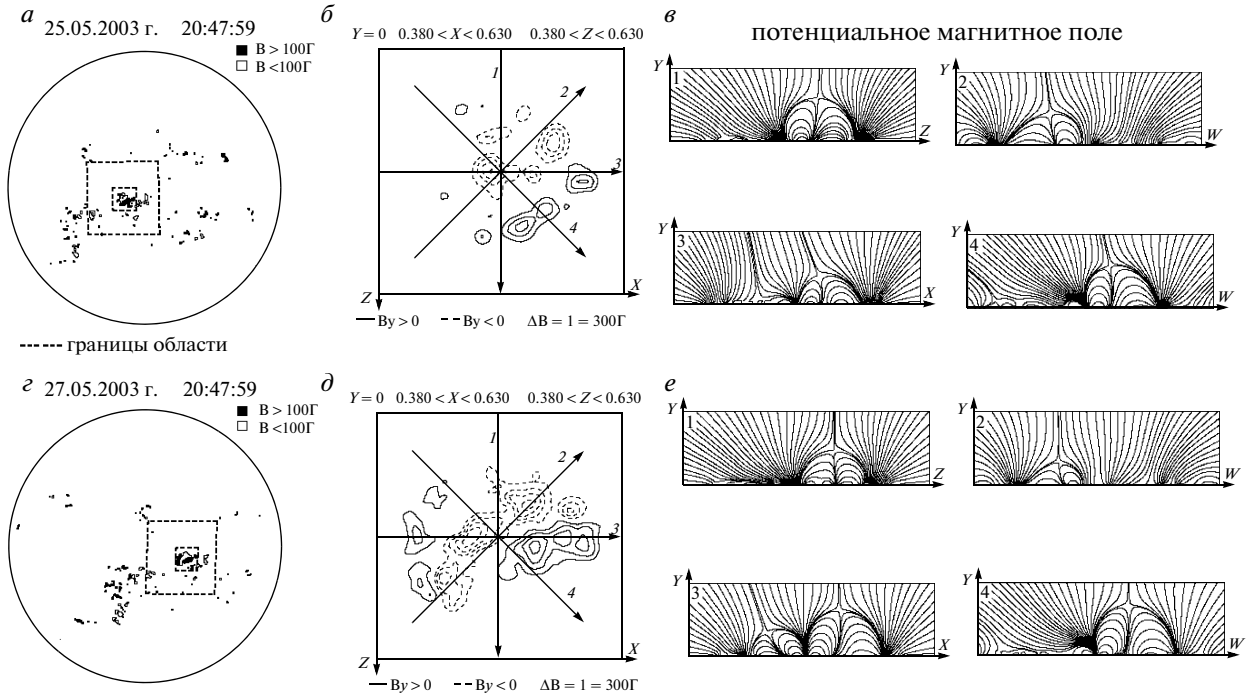


Рис. 4. (a), (z) – магнитные карты SOHO MDI на солнечном диске 25 и 27 мая 2003 г. Изображены положения доменов $L_0 = 4 \times 10^{10}$ и $L_0 = 1.2 \times 10^{10}$. (б) и (д) – изолинии нормальной компоненты магнитного поля в активной области. (е) и (е) – конфигурации потенциального магнитного поля в плоскостях, перпендикулярных фотосфере, проекции плоскостей (1–4) показаны на (б) и (д).

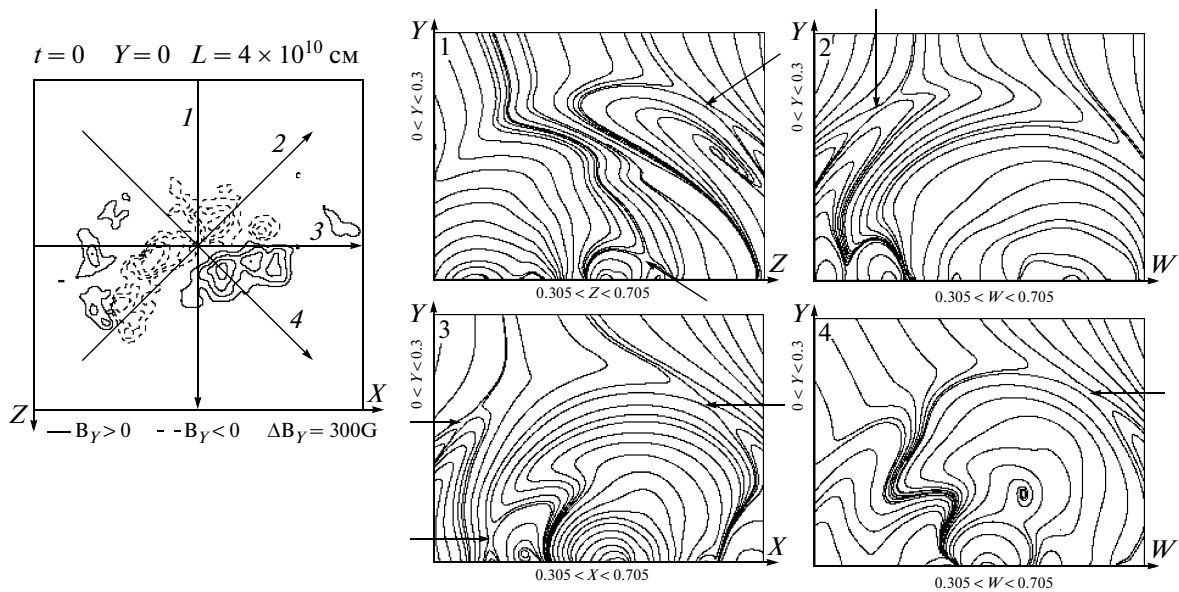


Рис. 5. Вычисленная конфигурация магнитного поля в короне над активной областью АО 10365 перед серией вспышек, в плоскостях, перпендикулярных фотосфере. Расположение плоскостей показано слева. Стрелками отмечены образовавшиеся токовые слои.

конфигурация магнитного поля над активной областью очень сложна, и для нахождения токовых слоев необходимо анализировать форму линий

магнитного поля в различных плоскостях. На рисунке 5 показаны линии магнитного поля в плоскостях, перпендикулярных фотосфере, для одно-

го из моментов времени ($t = 2.6$). Стрелки указывают положение образовавшихся токовых слоев. Слева представлены контуры распределения нормальной к фотосфере компоненты магнитного поля в активной области, и цифрами (1–4) показаны линии пересечения соответствующих плоскостей с фотосферой.

Анализ вычисленного трехмерного поля показал, что особые точки наиболее отчетливо проявляются в конфигурации магнитного поля в центральной плоскости ($Z = 0.5$), (рис. 6). Возникшие на фотосфере возмущения распространяются вверх в корону. Происходит деформация магнитного поля в окрестности X -точек (стрелки 1 и 2), существовавших в потенциальном магнитном поле в момент времени $t = 0$, и формируются токовые слои. К моменту времени $t = 2.2$ в окрестности обеих этих X -точек успевают сформироваться токовые слои, отмеченные стрелками 1 и 2, и возникает слой вблизи фотосферы, отмеченный стрелкой 3. Линии поля слоев 2 и 3 представлены в увеличенном масштабе внизу. Конфигурация поля соответствует типичным токовым слоям с нормальной компонентой магнитного поля. По мере всплывания магнитного потока токовые слои перемещаются вверх и к моменту времени 3.8 слой 2 выходит за пределы счетной области. Линии поля этого токового слоя располагаются так, что его трудно обнаружить в плоскости $Z = 0.5$.

Возникнув вблизи фотосферы, слой 3 перемещается и уходит за пределы области. Вблизи фотосферы появляются новые X -точки с образовавшимися в их окрестностях токовыми слоями (стрелки 4–8). Следует подчеркнуть, что такая динамика токовых слоев и особых точек обнаруживает себя только в достаточно большой расчетной области, содержащей всю активную область.

На рисунке 7 показаны линии поля в трехмерном пространстве вблизи горизонтально расположенного слоя, обозначенного на рисунке стрелкой 2. Эти данные соответствуют конфигурации поля, возникшей 26 мая 2003 г. Линия магнитного поля, пересекающая плоскость $Z = 0.5$ в особой X -точке этого слоя, перпендикулярна плоскости $Z = 0.5$.

Взрывное выделение энергии может произойти из-за развития неустойчивости каждого из образовавшихся токовых слоев. Токовые слои вновь образовавшихся X -точек формируются на малых высотах в области более сильного магнитного поля. Даже при малых размерах этих токовых слоев запасенная энергия $\int (B^2/8\pi)dv$ может быть достаточна, чтобы вызвать более мощную вспышку, чем при распаде слоя, образованного на большой высоте. В окрестностях ранее существующих в потенциальном поле X -точек токовые слои располагаются на больших высотах, где магнитное поле, а следовательно и энергия поля токовых сло-

ев, меньше. Таким образом, результаты численного трехмерного МГД моделирования демонстрируют образование нескольких токовых слоев над активной областью АО 10365 перед возникновением серии вспышек.

4. РАДИОИЗЛУЧЕНИЕ ИЗ ТОКОВОГО СЛОЯ ВО ВРЕМЯ ВСПЫШКИ

Одним из полезных методов диагностики вспышки является исследование радиоизлучения вспышки. Вспышка сопровождается несколькими типами радиоизлучения, генерируемыми как из области самой вспышки, так и из ударной волны, возбуждаемой в короне корональным выбросом массы и потоком ускоренных электронов [Benz, 2005; Богод, 2007; Altyntsev et al., 2003]. Долгое время оставался не ясным вопрос: генерируется ли радиоизлучение непосредственно в токовом слое?

Для ответа на этот вопрос было проведено трехмерное МГД моделирование над активной областью АО 10365, в которой произошла серия вспышек 26–29 мая 2003 [Подгорный и др., 2007; Podgorny et al., 2008]. Во время одной из вспышек класса M1.4, происшедшей 02:43 27 мая 2003 г и зарегистрированной на Сибирском Солнечном Радиотелескопе (Иркутск) на длине волны 5.2 см, был зафиксирован максимум интенсивности радиоизлучения в точке (S6.58 W5.98).

Для определения положения токового слоя начальные условия задавались потенциальным магнитным полем над активной областью, вычисленным из карт SOHO MDI. Параметры в расчетах выбраны согласно принципу ограниченного моделирования [Podgorny, 1978]: магнитное число Рейнольдса $Re_m = 10^3$, число Рейнольдса $Re = 300$, отношение давления плазмы к давлению магнитного поля $\beta = 0.6 \times 10^{-5}$, число Пекле $\Pi = 100$, число Пекле в направлении перпендикулярном магнитному полю $\Pi_B = 10^4$.

Результаты моделирования показали, что конфигурация магнитного поля в короне в АО 10365 в предвспышечном состоянии содержит несколько особых линий, в окрестности которых может образовываться ТС в результате фокусировки возмущений. Положение максимума плотности тока в одном из слоев ($x = 0.2489$, $y = 0.2502$, $z = 0.6$) с точностью до 1° в гелиоцентрической системе координат совпало с максимумом интенсивности радиоизлучения. Положение проекции максимума плотности тока на фотосферную границу расчетной области и максимум измеренной интенсивности радиоизлучения показаны на рис. 8 крестиками. На рисунке 8a наложено изображение изолиний нормальной компоненты магнитного поля, рассчитанного в потенциальном приближении, на плоскости фотосферы. Таким образом,

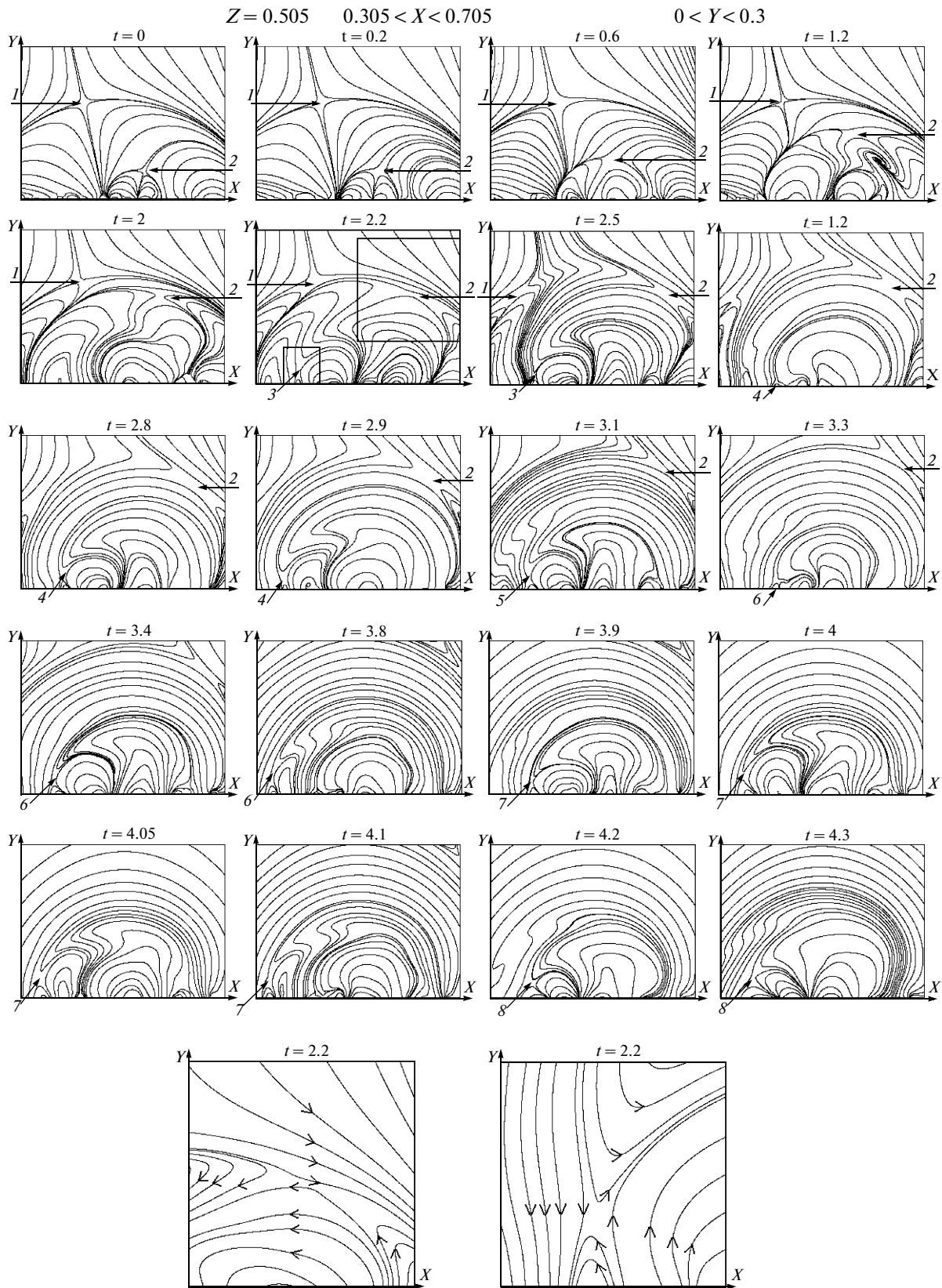


Рис. 6. Динамика линий магнитного поля в плоскости $z = 0.5$, демонстрирующая образование токовых слоев над активной областью. Внизу в растянутом масштабе представлены линии поля в окрестностях двух токовых слоев, показанных стрелками 2 и 3 в момент времени 2.2.

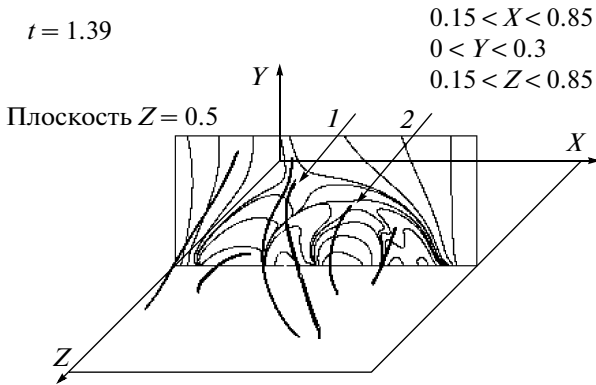


Рис. 7. Характерные линии магнитного поля в трехмерном пространстве (жирные линии) и на плоскости $z = 0.5$. Плоскость $z = 0.5$ пересекается двумя особыми линиями в X -точках по нормальям к этой плоскости (стрелки 1 и 2).

форму спирали Архимеда. Одновременно со вспышкой возникает импульс γ -излучения, вызванного ядерными реакциями под действием ускоренных протонов, попадающих на Солнце. Длительность импульса γ -излучения ~ 10 мин, что, по-видимому, определяется длительностью генерации релятивистских протонов. Однако нейтронные мониторы демонстрируют длительность потока релятивистских протонов, измеряемую часами. Такие запаздывающие релятивистские протоны не могут принадлежать к прямому потоку от области вспышки. Спектр быстрой компоненты релятивистских протонов [Балабин и др., 2005] является экспоненциальным $\sim \exp(-E/E_0)$, где типичное E_0 составляет 0.5 ГэВ. Спектры, снятые через 0.5 ч, 1 ч и 2 ч после начала вспышки, хорошо описываются линейной зависимостью в двойном логарифмическом масштабе, т. е. уверенно демонстрируют степенной спектр $\sim E^{-\gamma}$, где $\gamma \sim 5$.

было показано, что вспышечное радиоизлучение на длине волны действительно возникает в токовом слое.

5. СОЛНЕЧНЫЕ КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ

Поток релятивистских протонов со спектром, простирающимся за 10 ГэВ, регистрируется обычно от вспышек, происходящих на западной части солнечного диска. Фронт импульса (“быстрая” компонента) появляется с задержкой, соответствующей времени пролета релятивистских частиц в межпланетном пространстве вдоль линий межпланетного магнитного поля, имеющих

Ускорение заряженных частиц до релятивистских энергий может происходить вдоль особой линии магнитного поля в электрическом поле Лоренца $\mathbf{E} = -\mathbf{V} \times \mathbf{B}/c$, возникающем при втекании плазмы в слой [Подгорный и Подгорный, 1997б]. Эффективность ускорения частиц электрическим полем Лоренца, направленным вдоль особой линии магнитного поля, следует из лабораторных экспериментов с мощным импульсным разрядом (рис. 9). Такие эксперименты ставились в связи с проблемой управляемого термоядерного синтеза [Лукиянов и Подгорный, 1956]. Измерения показали, что во время максимальной скорости сжатия плазменного разряда частицы приобре-

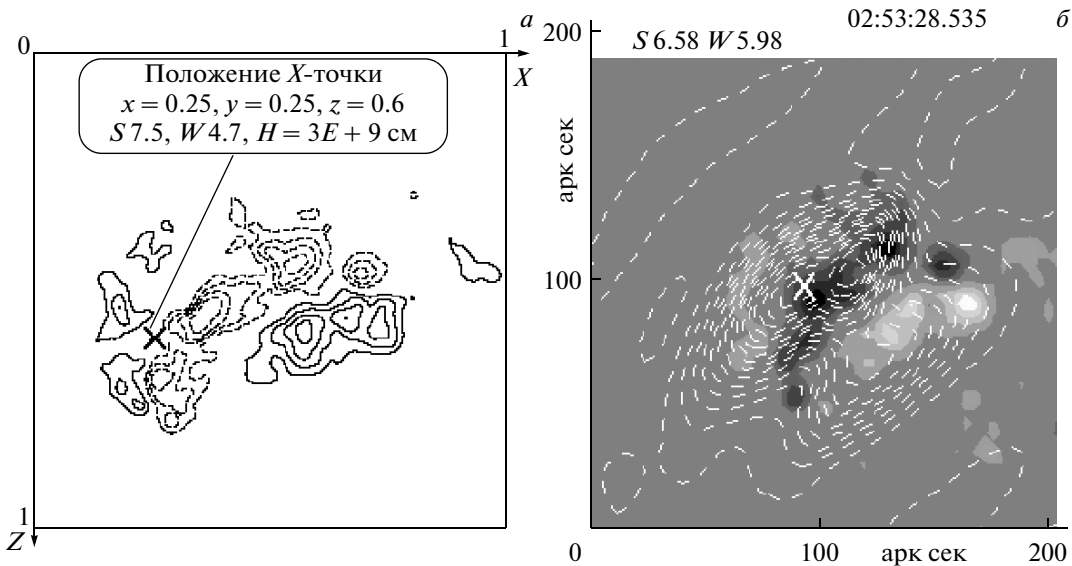


Рис. 8. Сравнение результатов расчета и радио измерений вспышки. (а) — эквипотенциальные линии нормальной компоненты магнитного поля (штрих — отрицательные значения) на фотосферной границе расчетной области, крестиком обозначено положение максимума плотности тока в слое. (б) — интенсивность радиоизлучения, наложенного на магнитограмму вспышки 27.05.03. в 02:53:28.54, крестиком обозначено положение максимума яркостной температуры.

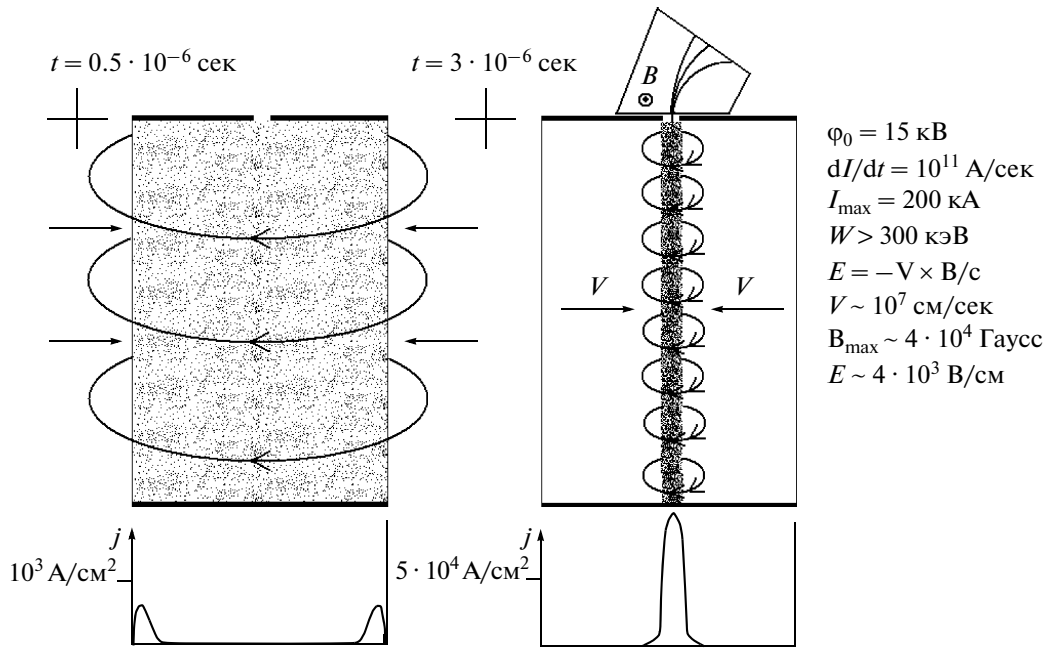


Рис. 9. Лабораторный эксперимент с мощным импульсным разрядом, демонстрирующий ускорение частиц при сжатии разряда собственным магнитным полем. Внизу распределение плотности разрядного тока.

тают энергию большую 300 кэВ при приложенной к электродам разности потенциалов около 15 кэВ [Подгорный и др., 1958].

Для выяснения характера спектра частиц, ускоряемых в токовом слое, был проведен расчет методом пробных частиц [Подгорный и др., 2010; Podgorny et al., 2010], в котором использовалась конфигурация полей (рис. 10), полученная в трехмерном численном магнитогиродинамическом эксперименте для вспышки Бастилия (14.07.2000). Расчет показал экспоненциальный показатель спектра (рис. 11), совпадающий с измеренным, при скорости магнитного пересоединения 10^7 см/с. Таким образом, был оценен главный параметр вспышки – скорость магнитного пересоединения.

Запаздывающая компонента релятивистских протонов не может быть объяснена прямым потоком частиц из области вспышки. Естественно предположить, что запаздывающая компонента генерируется в ударной волне, генерируемой корональным выбросом. Однако высокий показатель степени $\gamma \sim 5$ невозможно согласовать с существующими теориями ускорения частиц на ударных волнах. По-видимому, запаздывающая компонента, обладающая, в отличие от быстрой компоненты, довольно высокой изотропией, приходит к орбите Земли в результате диффузии, рассеиваясь на неоднородностях, и это рассеяние изменяет спектр частиц, ускоренных в токовом слое.

7. СВЯЗЬ МАГНИТНОГО ПОТОКА АКТИВНОЙ ОБЛАСТИ С ПОЯВЛЕНИЕМ ВСПЫШЕК

Рядом авторов предпринимались попытки выяснить связь эволюции полей активной области с возникновением вспышек и провести анализ поведения магнитного поля и токов в момент вспышки на уровне фотосферы. Подробный обзор работ на эту тему содержится в статье [Wang et al., 2009]. Результаты явно противоречивы, и однозначного заключения о характере фотосферных возмущений в момент вспышки сделать нельзя.

Солнечные вспышки происходят над активными областями после возрастания в этих областях магнитного поля. Перемещаясь по диску в результате вращения Солнца, большая активная область может дать серию мощных вспышек. В течение серии вспышек конфигурация магнитного поля активной области продолжает медленно изменяться, однако основные элементы активной области сохраняются обычно часами, и происходят флуктуации поля в отдельных точках активной области.

Связь медленно меняющегося магнитного потока активной области с появлением вспышек исследовалась в работе [Ishkov, 2001], в которой минимальный поток активной области, дающей вспышку, оценивается как $\Phi > 10^{21}$ Мкс. Однако оценка магнитного потока непосредственно по данным SOHO MDI, которые представляют карты компоненты поля, направленной вдоль луча зрения, не учитывает сильной зависимости изме-

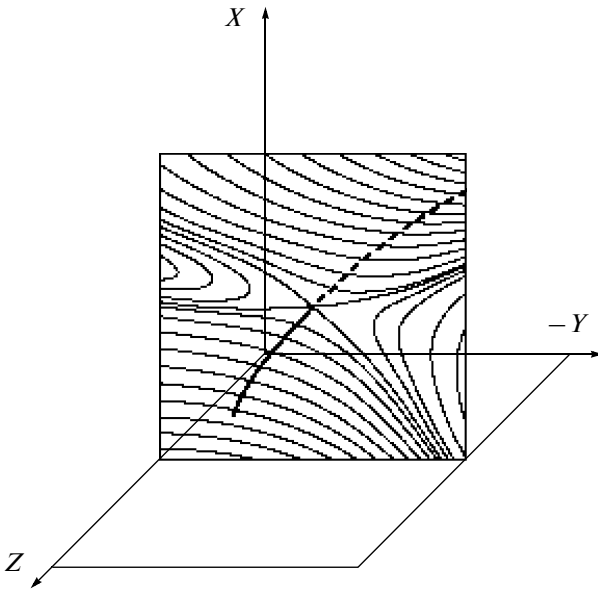


Рис. 10. Конфигурация линий магнитного поля в плоскости перпендикулярной особой линии (жирная линия) в окрестности токового слоя, рассчитанного для вспышки Бастилия. За плоскостью особая линия показана штрихом.

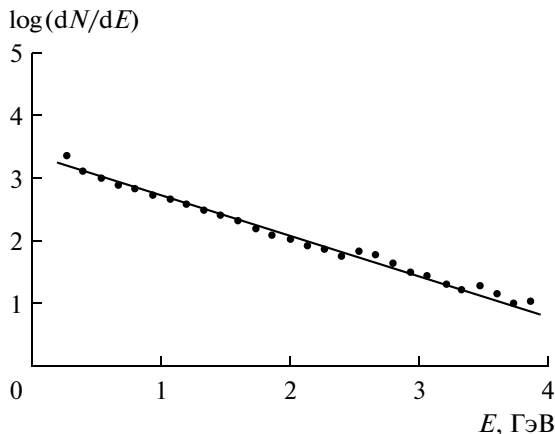


Рис. 11. Расчетный спектр релятивистских протонов, ускоренных в токовом слое.

ряемого потока от положения активной области на диске Солнца. Для исключения этой зависимости необходимо вместо потока магнитной компоненты, направленной вдоль луча зрения, использовать магнитный поток нормальной к фотосфере составляющей [Подгорный и Подгорный, 2011]. Нормальная составляющая активной области определялась из потенциального поля, полученного решением уравнения Лапласа с наклонной производной [Подгорный и Подгорный, 2008; Podgorny et al., 2009]. Применимость этого метода обусловлена расположением токового слоя на

большой высоте, когда его ток не вносит существенных изменений поля на фотосфере.

На рисунке 12 показан пример распределения компоненты магнитного поля по данным SOHO и распределение нормальной составляющей магнитного поля вблизи лимба, полученной из потенциального поля. Здесь представлен результат расчета активной области АО 10486, когда она сместилась относительно Восточного лимба на $\sim 30^\circ$. Величины Северной Φ_N и Южной Φ_S компонент магнитного потока даны на рисунке внизу. Из рисунка видно, что измеренные аппаратом SOHO распределения и величины потоков вблизи лимба сильно отличаются от распределений нормальной составляющей. Примененный метод позволил выяснить поведение нормальной составляющей магнитного потока в течение всего времени прохождения активной области через диск.

Начиная с 24.05.2003 г., магнитный поток области АО 10365 стал быстро возрастать (рис. 13). В это время величины Северного и Южного потоков практически совпадали. При прохождении по диску область дала четыре вспышки класса X: 27.05.2003 X1.3, 28.05.2003 X3.6, 29.05.2003 X1.2, и 31.05.2003 X1. Первые две большие вспышки произошли с интервалом около полутора часов, когда одновременно возрастали Северный и Южный магнитные потоки, и их значения достигли 1.65×10^{22} Мкс. Магнитные потоки непосредственно перед этими вспышками, между ними и сразу после них оставались постоянными с точностью до 2%. Далее Северная компонента магнитного потока почти не изменялась, а Южная компонента стала уменьшаться. Последняя сильная вспышка была зарегистрирована при $\Phi_N \sim 2.2 \times 10^{22}$ Мкс и $\Phi_S \sim 1.45 \times 10^{22}$ Мкс.

Аналогичное поведение обнаруживают и другие активные области, в частности АО 10486, давшая в течение 9 дней четыре мощных вспышки, в том числе и вспышку X17. Таким образом, данные настоящей работы и данные работы [Ishkov, 2001] показали, что вспышки возникают после возрастания магнитного потока активной области до некоторого критического значения. Для мощных вспышек это значение составляет $\Phi \sim 10^{22}$ Мкс. Это условие появления мощных вспышек является необходимым, но не достаточным. Если активная область не является очень сложной, т. е. обладает только одной нейтральной линией, разделяющей две подобласти с линиями поля противоположного направления, то вспышка обычно не возникает. В такой биполярной конфигурации в короне не может сформироваться особая линия.

На фоне медленной эволюции активной области наблюдаются кратковременные изменения поля. Возникает вопрос о связи таких флуктуаций поля с динамикой вспышки. Наиболее заметные

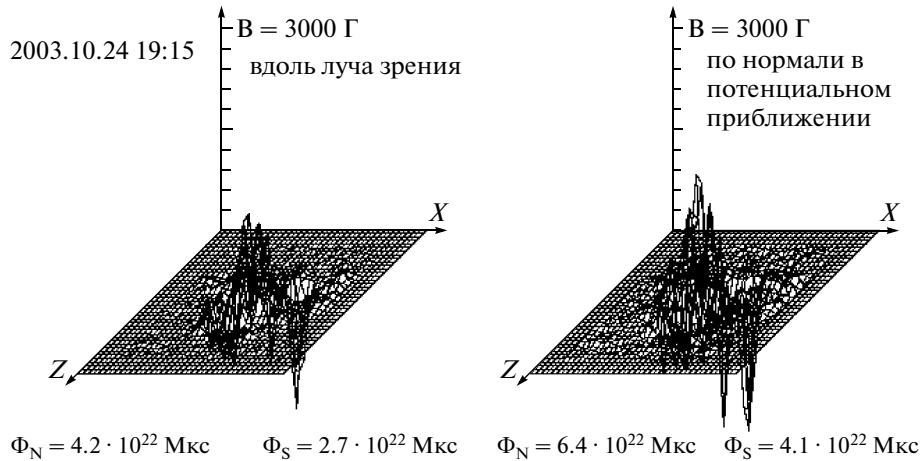


Рис. 12. Распределение магнитного поля в активной области АО 10486, смещенной относительно центра диска (24.10.2003 г. 19:15) из обработки данных SOHO MDI (а). Вычисленное распределение нормальной составляющей магнитного поля (б). Распределения полей показаны на площади 4×10^{10} см \times 4×10^{10} см.

локальные изменения магнитного поля в активной области АО 10720 во время вспышки 20.01.2005 г. были обнаружены в работе [Wang et al., 2009]. В отдельных точках области наблюдалось падение магнитного поля на величину около 100 Гаусс. Уменьшение поля начиналось за ~2 часа до начала вспышки. Однако измерения проводились в неблагоприятных условиях, когда АО 10720 находилась вблизи западного лимба (N12 W56). Луч зрения составлял малый угол с поверхностью Солнца, и для получения результата данные магнитных измерений, по словам авторов работы, “распутывались комбинированием интуитивного геометрического анализа и преобразования магнитограмм в гелиографическую систему координат” (untangled by combining intuitive geometric analysis and a transformation of the magnetogram into the heliographic coordination system).

Измерения в активной области АО 10486 оказались исключительно удачными для анализа поведения поля активной области в момент вспышки — одно из измерений магнитного поля с точностью до 1 мин совпало с максимумом рентгеновского излучения (X17, S18E20, 28.10.2003, t_{\max} — 11:10), регистрируемого аппаратом GOES, а максимум вспышки (X10, S19W09, 29.10.2003, t_{\max} — 20:49) был зарегистрирован через 2 минуты после измерения карты поля. Эти данные не обнаруживают сколько-нибудь значительных изменений магнитного поля во время вспышек.

Магнитный поток, нормальный к поверхности Солнца, во время самой большой вспышки X17, S18E20 остается неизменным с точностью до двух-трех процентов. Магнитные потоки, как Северный, так и Южный, оставались практически постоянными перед вспышкой, в момент вспышки и после нее. Распределения магнитного поля

до, во время и после вспышки, а также величины магнитных потоков даны на рис. 14. Величины магнитных потоков и максимальные значения полей представлены внизу. Изменение потока не превышало 1% за час. Единственной особенностью во время этой вспышки явилось появление мелко-масштабного локального максимума поля, отмеченного на рисунке стрелкой, появление которого не вызвало заметного изменения потока. Однако такие флуктуации поля наблюдаются в течение всей эволюции активной области, и нет никаких оснований связать этот максимум с динамикой вспышки. Возможно, быстрое локальное возрастание поля вызвало возмущение, инициировавшее неустойчивость токового слоя. Во время мощной предшествующей вспышки X1.2 также не было обнаружено изменение магнитных потоков нормальной составляющей. На отсутствие резких изменений конфигурации поля во время

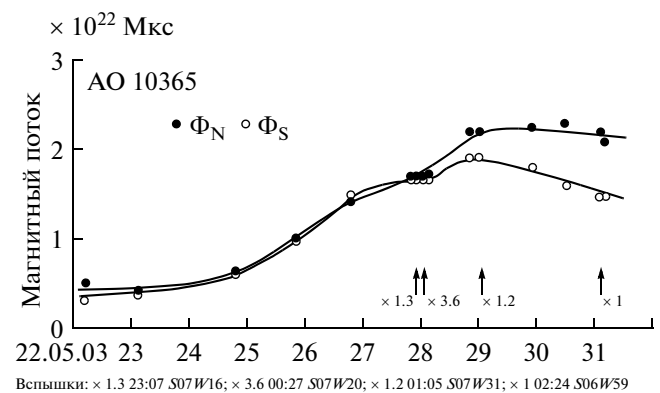


Рис. 13. Зависимость от времени северного Φ_N и южного Φ_S магнитных потоков в активной области АО 10365 во время серии мощных вспышек.

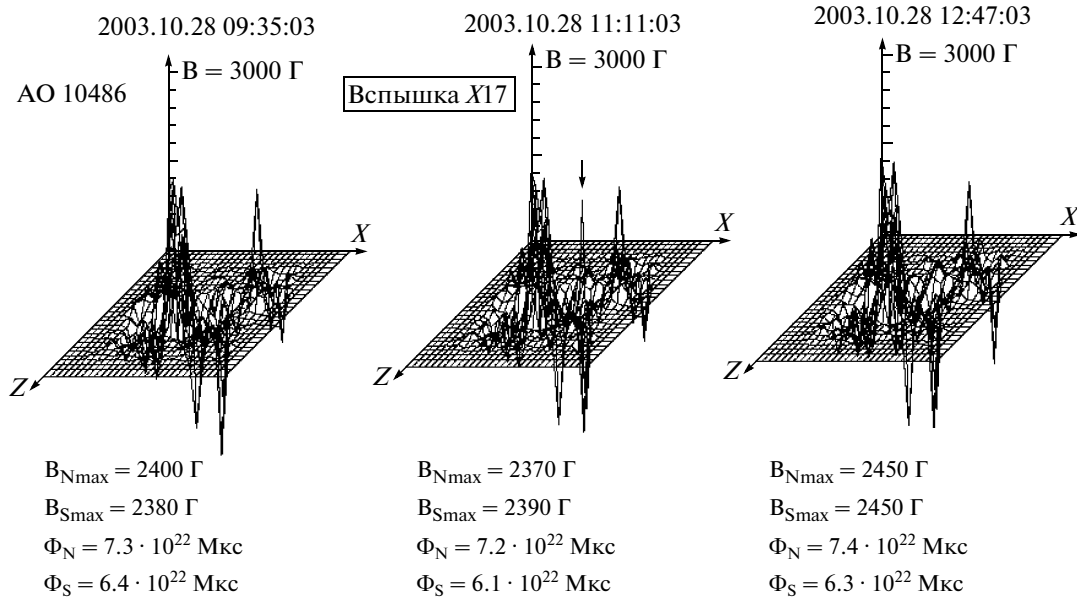


Рис. 14. Распределения магнитного поля в активной АО 10486 перед вспышкой класса X17, во время вспышки и после нее.

вспышек указывают и магнитные измерения в АО 10365 до и после вспышек класса X, возникших 27 и 28 мая 2002 г., с интервалом около 1.5 часа. Магнитный поток оставался постоянными с точностью до 2%. Изменение потока не превышало возможных ошибок расчета. Такую динамику магнитного поля невозможно согласовать с предположением о механизме вспышки, связанном с потоком магнитной энергии, поступающим от фотосферы в момент вспышки. Эти результаты согласуются с выводами из численных МГД экспериментов, демонстрирующих медленное накопление энергии в короне над активной областью перед вспышкой. Реакция фотосферного поля на вспышечное выделение энергии высоко в короне не может быть значительной, чаще всего она практически незаметна.

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Электродинамическая модель вспышки, построенная по данным трехмерного численного моделирования, объясняет происхождение комплекса явлений, наблюдаемых при вспышке: положение и характер спектров источников рентгеновского излучения, выброс корональной массы, генерацию солнечных космических лучей и др. Использование в программе ПЕРЕСВЕТ карт магнитного поля вместо аппроксимации поля локальными источниками позволило определить положение в короне вспышечного токового слоя и показать образование нескольких токовых слоев перед серией вспышек. Полученные в трехмерном МГД моделировании распределения электрического и магнитного полей были использованы для вы-

числения спектра релятивистских протонов, возникающих во время вспышки. Сравнение вычисленного и измеренного спектров позволило впервые оценить скорость магнитного пересоединения в токовом слое, которая равна $\sim 10^7$ см/с. Вспышки появляются над активными областями, когда магнитный поток области превосходит некоторое критическое значение. Однако это условие не является достаточным.

Работа поддержана грантом РФФИ № 09-02-00043.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Балабин Ю.В., Вашенюк Э.В., Мингалев О.В., Подгорный А.И., Подгорный И.М. Спектр солнечных космических лучей: данные наблюдений и модельных расчетов // Астрон. журн. Т. 82. № 10. С. 940–949. 2005.
- Богод В.М. Исследования атмосферы Солнца на основе многоволновых наблюдений Солнца на РАТАН-600 // Тр. Всероссийской конф. “Многоволновые исследования солнца и современные проблемы солнечной активности”. САО РАН, Санкт-Петербург. С. 2–26. 2007.
- Лукьянов С.Ю., Подгорный И.М. Жесткое рентгеновское излучение, сопровождающее разряд в газе // Атомная энергия. Т. 1. № 3. С. 97–106. 1956.
- Подгорный А.И., Подгорный И.М. Динамика струи плазмы в магнитосфере в МГД-приближении 2 // Космич. исслед. Т. 35. № 3. С. 253–262. 1997а.
- Подгорный А.И., Подгорный И.М. Ускорение частиц в токовом слое // Изв. РАН, Сер. физ. Т. 61. № 6. С. 1067–1069. 1997б.
- Подгорный А.И., Подгорный И.М. Моделирование солнечной вспышки при всплывании нового магнитного потока // Астрон. журн. Т. 78. № 1. С. 71–77. 2001.

- *Подгорный А.И., Подгорный И.М.* Модель солнечной вспышки: сопоставление с наблюдением высокоэнергетических процессов // *Астрон. журн.* Т. 83. № 10. С. 940–949. 2006.
- *Подгорный А.И., Подгорный И.М., Мешалкина Н.С.* Моделирование токового слоя во вспышечной активной области и сопоставление с данными радиоизлучения // *Астрон. вестн.* Т. 41. № 4. С. 353–360. 2007.
- *Подгорный А.И., Подгорный И.М.* Образование нескольких токовых слоев над активной областью АО 10365 перед серией вспышек // *Астрон. журн.* Т. 85. № 8. С. 739–749. 2008.
- *Подгорный А.И., Подгорный И.М.* О механизмах генерации жесткого рентгеновского излучения и релятивистских протонов в солнечной вспышке // *Астрон. журн.* Т. 87. № 7. С. 704–716. 2010.
- *Подгорный А.И., Подгорный И.М.* Магнитный поток активной области и его связь со вспышками. // *Астрон. журн.* Т. 88. № 7. С. 684–691. 2011.
- *Подгорный А.И., Подгорный И.М.* Магнитогиродинамическое моделирование солнечной вспышки. 1. Токовый слой в короне. // *Геомагнетизм и аэрономия.* Т. 52. № 2. С. 163–175. 2012.
- *Подгорный И.М., Ковальский Н.Г., Пальчиков В.Е.* Электроны, вызывающие жесткое рентгеновское излучение импульсных разрядов // *ДАН.* Т. 123. 825–828 (1958).
- *Подгорный И.М., Балабин Ю.В., Ващенко Э.В., Подгорный А.И.* О механизмах генерации жесткого рентгеновского излучения и релятивистских протонов в солнечной вспышке // *Астрон. журн.* Т. 87. № 7. С. 704–716. 2010.
- *Сыроватский С.И.* Динамическая диссипация магнитной энергии в окрестности нейтральной линии магнитного поля // *ЖЭТФ.* Т. 50. № 4. С. 1133–1147. 1966.
- *Altynsev A. T., Lesovoi S. V., Meshalkina N. S., Sych R. A., Yihua Yan.* The microwave subsecond pulse of September 17, 2001 // *Astronomy & Astrophysics.* V. 400. P. 337–346. 2003.
- *Benz A., Grigis P. C., Csillaghy A., Saint-Hilaire P.* Survey on solar X-ray flares and associated coherent radio emission // *Solar Phys.* V. 226. № 1. P. 121–142. 2005.
- *Cox D. P., Tucker W. H.* Ionization Equilibrium and Radiative Cooling of a Low-Density Plasma // *Astrophys. J.* V. 157. № 3. P. 1157–1167. 1969.
- *Dryer M.* Comments on the origins of coronal mass ejections // *Solar Phys.* V. 169. № 2. P. 421–429. 1996.
- *Dungey J. W.* Cosmic electrodynamics. Cambridge. Un. Press. 1958.
- *Haerendel G.* Field-aligned currents in the Earth's magnetosphere // *Geophysical Monograph* 58. Ed. By Russell C. T. Prist., E. R., Lee L. C. AGU. P. 539–553. 1990.
- *Hiei E., Hundhausen A. J.* Development of a coronal helmet streamer of 24 January 1992 // *Magnetodynamic phenomena in the solar atmosphere.* Ed. By Uchida Y., Kosugi T., Hudson S. Kluwer Acad. Pub. P. 125–126. 1996.
- *Ishkov V. N.* Evolution and forecast of flare activity in the current solar cycle 23 // *Astronomical and Astrophysical Trans.* V. 20. № 3. P. 563–569. 2001.
- *Kaufmann P., Trotter G., Gimenez de Castro C. G., Raulin J. P., Krucker S., Shih A. Y., Levato H.* Sub-terahertz, Microwaves and High Energy Emissions During the 6 December 2006 Flare, at 18:40 UT // *Solar Phys.* V. 255. № 1. P. 131–142. 2009.
- *Kiplinger A. L., Garcia H. A.* Soft X-ray parameters of the great flares of active region 486 // *Bull. American Astron. Soc.* V. 36. P. 739. 2004.
- *Krucker S., Hurford G. J., MacKinnon et al.* Coronal γ -Ray Bremsstrahlung from Solar Flare-accelerated Electrons // *Astrophys. J.* V. 678. № 1 P. L63–L66. 2008a.
- *Krucker S., Wuelser, J.-P., Vourlidis A. et al.* STEREO and RHESSI observations of electron acceleration in a partially Disk-Occulted Solar Flare. *Proc. of ESPM-12.* 2008b. <http://espm.kis.uni-freiburg.de>
- *Lin R. P., Krucker S., Hurford G. J. et al.* RHESSI observations of particles acceleration and energy release in an intense gamma-ray line flare // *Astrophys. J.* V. 595. № 2. P. L69. 2003.
- *Masuda S., Kosugi T., Hara H., Tsuneta S., Ogawara Y.* A loop-top hard X-ray source in a compact solar flare as evidence for magnetic reconnection // *Nature.* V. 371. № 6497. P. 495–497. 1994.
- *Minami S., Podgorny A. I., Podgorny I. M.* Laboratory evidence of earthward electric field in the magnetotail current sheet // *Geophys. Res. Letts.* V. 20. № 1. P. 9–12. 1993.
- *Podgorny A. I., Podgorny I. M.* Solar flare model including the formation and destruction of the current sheet in the corona // *Solar Phys.* V. 139. № 1. P. 125–145. 1992.
- *Podgorny A. I., Podgorny I. M., Meshalkina N. S.* The numerical MHD simulation of solar flare // *J. Atmos. Solar Terr. Phys.* V. 70. P. 621–626. 2008.
- *Podgorny A. I., Podgorny I. M., Meshalkina N. S.* Numerical MHD Simulations of the Appearance of a Series of Current Sheets above the Active Region AR 0365 // *Geomagnetism and Aeronomy.* V. 49, № 8, P. 1120–1124. 2009.
- *Podgorny I. M.* Simulation Studies of Space // *Fundamentals of Cosmic Physics.* V. 1. № 1. P. 1–72. 1978.
- *Podgorny I. M., Dubinin E. M., Israilevich P. L., Nicolaeva N. S.* Large-scale structure of the electric field and field-aligned currents in the auroral oval from the Interkosmos-Bulgaria satellite data // *Geophys. Res. Letts.* V. 15. № 13. P. 1538–1540. 1988.
- *Podgorny I. M., Balabin Yu. V., Podgorny A. I., Vashenyuk E. V.* Spectrum of solar flare protons // *Journ. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 72. № 13. P. 988–991. 2010.
- *Somov B. V., Kosugi T.* Collisionless reconnection and high-energy particles acceleration in solar flares // *Astrophys J.* V. 485. № 2. P. 859–868. 1997.
- *Svestka Z. P., Fontenla J. M., Machado M. E. et al.* // Multi-thermal observations of newly formed loops in a dynamic flare // *Solar Phys.* V. 108. № 2. P. 237–250. 1987
- *Wang J., Zhao M., Zhou G.* Magnetic changes in the course of the X7.1 solar flare on 2005 January 20 // *Ap. J.* V. 690. № 1. P. 862–874. 2009.