

УДК 523.945+523.985.3+523.988

МОДЕЛЬ СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКИ: СОПОСТАВЛЕНИЕ С НАБЛЮДЕНИЯМИ ВЫСОКОЭНЕРГИЧНЫХ ПРОЦЕССОВ

© 2006 г. А. И. Подгорный¹, И. М. Подгорный²

¹Физический институт им. П.Н. Лебедева, Москва, Россия

²Институт астрономии, Москва, Россия

Поступила в редакцию 05.12.2005 г.; принята в печать 14.04.2006 г.

Отмечается, что новые данные об энергии и локализации центров жесткого излучения солнечной вспышки находятся в согласии с электродинамической моделью вспышки, основанной на аккумуляции свободной магнитной энергии в поле токового слоя. С помощью трехмерных МГД-расчетов показано, что энергия, запасаемая в магнитном поле токового слоя в предвспышечном состоянии, достаточна для вспышки и коронального выброса массы. Вспышка и корональный выброс возникают при взрывном распаде токового слоя. Положение максимума яркостной температуры радиоизлучения в момент вспышки совпадает с положением максимума тока в токовом слое. Экспоненциальный спектр релятивистских протонов, генерируемых в момент вспышки, согласуется с механизмом ускорения электрическим полем при распаде токового слоя.

PACS numbers : 96.60.qe, 96.60.ph

1. ВВЕДЕНИЕ

Солнечная вспышка и корональный выброс массы представляют собой наиболее мощные проявления активности Солнца. Энергия вспышки выделяется в короне над активной областью [1], и ускорение коронального выброса также происходит в короне [2]. Выделяемая при больших вспышках и сопровождающих их выбросах корональной массы энергия может составлять около 10^{33} эрг. Единственным источником этой энергии в солнечной короне является так называемая свободная магнитная энергия, которая может аккумулироваться в магнитном поле токовых систем над активной областью и быстро выделяется при вспышке в виде тепла, кинетической энергии потоков плазмы, электромагнитного излучения и ускоренных заряженных частиц. Необходимым условием взрывного вспышечного процесса является высокая плотность запасенной в поле токов энергии $B_c^2/8\pi$ по сравнению с плотностью энергии плазмы nkT , т.е. $\beta = 8\pi nkT/B_c^2 \ll 1$. Здесь B_c — магнитное поле токов в плазме, n — концентрация частиц, T — температура, k — постоянная Больцмана. Такие условия могут осуществиться в короне при возникновении токовых цепей над активной областью. Следует подчеркнуть, что здесь β не является тем безразмерным параметром, который вычисляется по потенциальному магнитному полю активной области. Потенциальное магнитное поле ответственно только за создание условий, в

которых может возникнуть тот ток, в магнитном поле которого накапливается свободная магнитная энергия. Таким образом, модель вспышки должна включать в себя механизм аккумуляции энергии магнитного поля токов и механизм ее взрывного перехода в другие формы, т.е. механизм быстрой диссипации токов.

На возможность постепенного накопления энергии в короне в поле токового слоя, образующегося в окрестности особой линии потенциального поля за счет возмущений, приходящих от фотосферы, впервые обратил внимание Сыроватский [3], а процесс быстрого распада токового слоя из-за пересоединения линий магнитного поля был продемонстрирован в лабораторных экспериментах Братенола и Хирша [4]. Образование токового слоя в окрестности особой линии магнитного поля детально исследовалось теоретически [5, 6], а также было показано в двумерных [7, 8] и трехмерных [9] численных МГД-экспериментах. В настоящей статье рассмотрено соответствие электродинамической модели солнечной вспышки [10–12], созданной на основании выполненного численного МГД-моделирования, результатам новых наблюдательных данных по вспышкам. Проблемы, возникающие при численном моделировании солнечных вспышек, и их решения изложены в работе [13].

Другая возможность образования токового слоя состоит в инъекции в поле магнитной арки потока плазмы, который вытягивает линии магнитного

поля. Такая модель была рассмотрена Форбесом и др. [14] и Лином [15]. Образование токового слоя в этой модели происходит при взаимодействии тока магнитного жгута (“горя”) с магнитным полем арки. Предполагается, что жгут первоначально возникает над фотосферой и располагается там перпендикулярно плоскости магнитной арки. При этом создается равновесная конфигурация, в которой сила отталкивания жгута от фотосферы $F = \frac{I^2 L}{c^2 r}$ током зеркального отображения, расположенным под фотосферой, уравновешивается силой $\mathbf{I} \times \mathbf{V}_p/c$, действующей на ток в поле арки. Здесь \mathbf{I} — ток в жгуте и \mathbf{V}_p — потенциальное поле арки, r — расстояние от жгута до фотосферы, L — длина шнура, c — скорость света. В случае преобладания силы отталкивания равновесие нарушается, жгут ускоряется и выбрасывается от Солнца, образуя корональный выброс. Одновременно происходит вытягивание линий магнитного поля арки с образованием вертикального токового слоя. Распад образовавшегося слоя должен вызвать солнечную вспышку. Модель [14, 15] объясняет связь коронального выброса и вспышки, но не отвечает на вопрос, каким образом возник ток \mathbf{I} и почему его выброс не вызывает сильных магнитных возмущений в фотосфере перед вспышкой.

Еще одна возможность возникновения вспышки была предложена Северным [16] в связи с обнаружением ускоренных частиц в лабораторных экспериментах с мощным импульсным разрядом [17]. Идея состоит в возбуждении в магнитной петле продольного тока неким фотосферным генератором. При быстром возрастании тока разряд сжимается собственным магнитным полем. При сжатии тока возникает электрическое поле $-\mathbf{V} \times \mathbf{B}/c$ (где \mathbf{V} — вектор скорости), направленное вдоль его оси, в котором происходит ускорение частиц. Такой эффект был исследован в работе [18]. Рассматривалось также ускорение заряженных частиц в локальных электрических полях при разрыве тока [19] или из-за резкого уменьшения проводимости при воздействии протуберанца на шнур с током [20]. Идея, основанная на токе в петле, получила новое продолжение в работе [21]. Возможность выброса коронального вещества и вытягивания линий поля при расширении магнитной петли с током, текущим вдоль поля, численно исследовалась в трехмерном МГД-приближении для плазмы с $\beta \ll \ll 1$. Авторы считают, что взрывное расширение петли происходит при развитии неустойчивости изгиба (“kink instability”) и связывают начало быстрой деформации магнитного поля с ростом тока до некоторого критического значения, когда скрученность линий поля превосходит 2π . Таким образом, различные модели, основанные на токе в петле, могут объяснять отдельные проявления вспышки.

Ряд авторов продолжает модифицировать идею, высказанную, по-видимому, впервые Соколовым [22] в 1981 г. на семинаре по солнечной физике в г. Симферополе, о быстром возникновении мощных магнитных полей над фотосферой. Рассматривается также возможность выталкивания плазмы градиентом давления плазмы ∇P [23, 24]. В качестве механизма возникновения большого ∇P рассматривается и падение кометы на Солнце [25]. В серии работ [23, 26] выполнено МГД-моделирование выталкивания тока \mathbf{I} , текущего перпендикулярно магнитному полю арки, силой $\mathbf{I} \times \mathbf{B}/c$. Направление тока \mathbf{I} в этих работах берется противоположным направлению тока, задаваемому в модели Лина [15]. С самого начала система неравновесна, и предполагается, что рост тока происходит за время, меньшее времени выброса плазмы. В численных трехмерных МГД-экспериментах [26] для генерации необходимого тока \mathbf{I} задается еще дополнительный магнитный поток, который пронизывает арку вблизи фотосферы. В тех местах, где этот поток пересекает границу счетной области, задается вращение, линии магнитного поля закручиваются, и формируется бессилового магнитный жгут (“горя”). Результаты МГД-расчета демонстрируют выброс жгута, основания которого закреплены во вращающихся солнечных пятнах. При выбросе жгута линии арочного магнитного поля вытягиваются, и происходит накопление свободной магнитной энергии. Для осуществления коронального выброса с энергией $\sim 10^{32}$ эрг необходимо, чтобы эта энергия была запасена в непотенциальном магнитном поле над активной областью за время, меньшее времени вспышки т.е. за $t \sim 10$ с. Вопрос о возможном механизме, обеспечивающем такое быстрое предварительное накопление энергии в магнитном поле, т.е. быстрое возрастание тока, в работах [23, 26] не обсуждается. В течение этих 10 с в фотосфере должны возникать вихри скорости и возмущения магнитного поля, вызванные генерацией жгута. Однако никаких сильных возмущений в момент вспышки в фотосфере не наблюдается. Остается также неясным, каким образом заданное неустойчивое равновесие может возникнуть над активной областью в реальных условиях. Проблема быстрого возрастания тока отсутствует в модели [15], где магнитная энергия медленно накапливается в равновесном состоянии, а затем быстро “реализуется” высоко в короне при потере системой устойчивости. Выброс корональной плазмы и образование вертикального токового слоя было продемонстрировано в численных двумерных МГД-экспериментах [27, 28]. Однако для задания начальных условий использовалось неустойчивое равновесие жгута, который был помещен в нейтральную точку, образованную

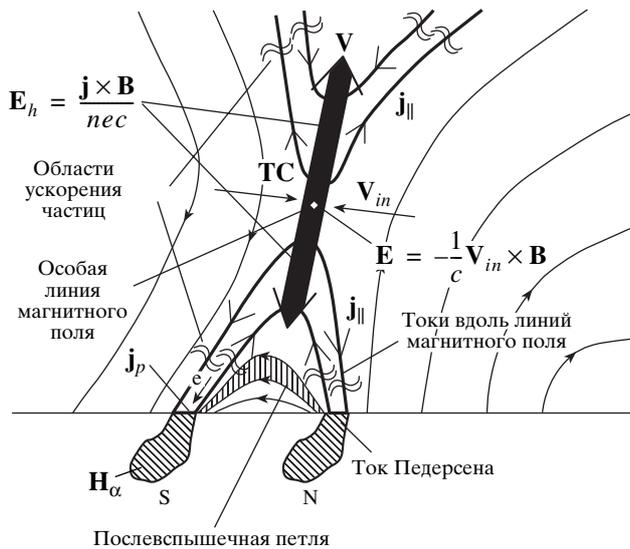


Рис. 1. Электродинамическая модель вспышки. Тонкими линиями и стрелками показаны линии магнитного поля, жирными линиями и стрелками показаны продольные токи.

комбинацией поля арки и поля тока отображения (“image current”).

Рассмотренные выше модели вспышки основаны на гипотезе о возникновении шнура с током над активной областью. Энергия выбрасываемого шнура с током, приобретаемая за счет взаимодействия с током отображения, $W \sim \int_{r_0}^r F dr$, где $F = \frac{I^2 L}{c^2 r}$, должна быть больше энергии вспышки. Принимая длину шнура $L = 10^9$ см и значение энергии $W = 10^{32}$ эрг, получим $I \sim \left[W \frac{100}{L \ln(r/r_0)} \right]^{1/2} \sim 10^{12}$ А. Нерешенной проблемой остается механизм генерации такого тока. Исключением является электродинамическая модель вспышки [10–12], в которой токовый слой (ТС) медленно формируется в окрестности особой линии за счет возмущений, приходящих от фотосферы.

2. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВСПЫШКИ

Электродинамическая модель вспышки [10–12] основана на результатах численного МГД-моделирования образования ТС над активной областью. Было показано, что ТС возникает перед вспышкой в короне в окрестности особой линии магнитного поля при фокусировке возмущений, приходящих от фотосферы, в частности при всплывании нового магнитного потока, противоположно направленного старому потоку активной области [11]. ТС устойчиво существует длительное время, и в его магнит-

ном поле запасается энергия, быстро выделяющаяся при солнечной вспышке, когда ТС переходит в неустойчивое состояние. Высокая устойчивость ТС при его образовании обусловлена присутствием в ТС нормальной составляющей магнитного поля (ТС не является нейтральным) и течением плазмы вдоль слоя. Затем происходит квазистационарная эволюция ТС, в ходе которой полная масса плазмы в ТС медленно падает со временем вследствие эжекции из ТС потока плазмы, ускоренной силой магнитного натяжения. Происходит перераспределение плотности плазмы по толщине слоя так, что плотность плазмы в центре слоя практически не меняется, а вблизи его границы падает. В результате такой эволюции ТС переходит в неустойчивое состояние, и происходит быстрая диссипация магнитной энергии, запасенной в поле ТС [29]. Численное моделирование перехода устойчивого слоя, стабилизированного течением плазмы, в неустойчивое состояние встречает ряд технических трудностей. Попытка МГД-моделирования распада ТС в короне была предпринята в Японии, однако в качестве начального состояния задавался не реальный устойчивый ТС, в поле которого накапливается энергия, а заведомо неустойчивый слой с нормальной компонентой магнитного поля, равной нулю [30].

Главным механизмом диссипации при взрывном распаде слоя является пересоединение, вызывающее нагревание плазмы в окрестности особой линии. Модель солнечной вспышки показана на рис. 1. В зависимости от начальной конфигурации поля активной области и характера возмущений фотосферы в предвспышечном состоянии, ТС может быть наклоненным под различным углом к поверхности Солнца. При вертикальном положении ТС, показанного на рис. 1, солнечная вспышка и корональный выброс возникают одновременно в едином взрывном процессе. Плазма со скоростью V_{in} втекает в ТС с обеих его сторон вместе с вмороженными линиями магнитного поля и после пересоединения линий поля растекается вдоль ТС вверх и вниз. При этом сила $\mathbf{j} \times \mathbf{B}/c$ (\mathbf{j} — плотность тока) ускоряет плазму, и поток плазмы вверх приводит к эжекции солнечного вещества в межпланетное пространство — возникает корональный выброс. Плазма, ускоренная вниз, образует вместе с сокращающимися линиями магнитного поля послевспышечные петли. Возникновение при вспышке потока плазмы из области пересоединения вниз было показано в работе Мак-Кензи и Хадсона [31]. Накопление над вершиной петли пересоединившихся линий поля должно привести к возрастанию светящейся петли. Перемещение светящегося фронта вверх может создать впечатление расширяющейся магнитной арки. Если ускоренный вниз поток плазмы приобретет сверхальфве-

новскую скорость, то при торможении плазмы на вершине петли может возникнуть ударная волна.

Нагревание плазмы при быстром пересоединении обеспечивает высокую температуру над петлей и на вершине петли, а следовательно, возникновение там рентгеновского излучения. Появление жесткого рентгеновского излучения из горячего плазменного образования над активной областью в начальной стадии вспышки впервые было показано при наблюдениях на аппарате *Yohkoh* [1, 32, 33].

Важной особенностью корональных ТС является генерация в слое электрического поля Холла $\mathbf{E}_h = \mathbf{j} \times \mathbf{B}/nc$, направленного вдоль слоя в ту же сторону, что и ускоряющийся вдоль ТС поток плазмы. Вследствие высокой анизотропии проводимости плазмы в магнитном поле короны поле Холла генерирует электрические токи вдоль линий магнитного поля, пересекающих ТС. Продольные токи и их направление показаны на рисунке жирными линиями. Эти токи замыкаются в хромосфере токами Педерсена благодаря присутствию там нейтральных атомов. Электроны, ускоренные в направленном вверх продольном токе, высыпаются в хромосферу и вызывают свечение вспышечных лент и жесткое рентгеновское излучение. Процесс генерации свечения здесь аналогичен механизму, вызывающему полярные сияния [12]. Энергия рентгеновского излучения, вызываемого высыпавшимися в хромосферу электронами, зависит от четырех параметров ТС: плотности тока в слое, плотности плазмы в нем, величины нормальной составляющей магнитного поля и протяженности токового слоя. В типичном случае энергия может достигать сотен кэВ. Высыпание быстрых электронов вызывает хромосферное испарение и дополнительное наполнение петли потоком плазмы из хромосферы [24].

Диссипация магнитной энергии при втекании плазмы в вертикальный ТС вместе с вмороженными линиями магнитного поля должна привести к часто наблюдаемому явлению — расхождению вспышечных лент. Действительно, по мере того, как в слой поступают новые линии магнитного поля, основания вспышечной петли, а вместе с ними и продольные токи, должны смещаться друг относительно друга. Вместе с токами должны смещаться и потоки ускоренных электронов, высыпавшихся на поверхность Солнца и вызывающих свечение лент. Для слоя, расположенного горизонтально, возможно сближение лент, так как в этом случае в слой поступают линии поля из вершины петли [10].

Условия для генерации частиц сверхвысоких энергий — солнечных космических лучей — создаются в окрестности особой линии магнитного поля. В частном случае это линия нулевого магнитного поля. На рис. 1 особая линия перпендикулярна

плоскости рисунка. Электрическое поле $-\mathbf{V}_{in} \times \mathbf{B}/c$ возникает при втекании плазмы в ТС. Оно направлено перпендикулярно плоскости рисунка. Здесь \mathbf{V}_{in} — скорость втекания плазмы в слой, т.е. скорость пересоединения, \mathbf{B} — магнитное поле ТС. Частицы (ионы и электроны) могут ускоряться вдоль особой линии в ее окрестности в электрическом поле $-\mathbf{V}_{in} \times \mathbf{B}/c$. При максимальной скорости втекания, близкой к альфвеновской скорости, энергия протонов в принципе может превзойти сотни ГэВ. Частицы, находящиеся дальше от особой линии, дрейфуют в скрещенных электрическом и магнитном полях. Они не могут ускориться до больших энергий.

Таким образом, энергия, освобождающаяся при распаде ТС, расходуется на вспышку, корональный выброс массы и генерацию солнечных космических лучей. Часть ускоренных протонов, попадая на поверхность Солнца, вызывает ядерные реакции, сопровождаемые γ -излучением. Следовательно, регистрируемая длительность γ -излучения определяется длительностью генерации релятивистских протонов.

Исследования, проведенные на аппарате RHESSI [34, 35], нейтронных мониторах [36, 37], радиотелескопе SSRT [38], и численные эксперименты [39, 40] позволили получить новые доказательства правильности электродинамической модели вспышки.

3. АККУМУЛЯЦИЯ МАГНИТНОЙ ЭНЕРГИИ ПЕРЕД ВСПЫШКОЙ

Количественный анализ накопления энергии в магнитном поле ТС для вспышки был выполнен в численных трехмерных МГД-экспериментах [39, 40]. Никаких специальных предположений о характере протекающих процессов не делалось. Магнитное поле активной области аппроксимировалось полями вертикальных диполей, помещенных под фотосферой. В этом приближении определялось потенциальное магнитное поле над активной областью. Вычисленное за четыре дня перед вспышкой потенциальное поле использовалось в качестве начального магнитного поля, и исследовалось возникновение ТС и его эволюция при наблюдаемом изменении фотосферного поля. Трехмерные МГД-расчеты с учетом диссипации и анизотропии теплопроводности были выполнены для предвспышечного состояния вспышки Бастилия. Показано, что перед вспышкой Бастилия над активной областью NOAA 9077 образовывался ТС, в магнитном поле которого аккумулировалась свободная энергия $\sim 10^{32}$ эрг, что достаточно для вспышки.

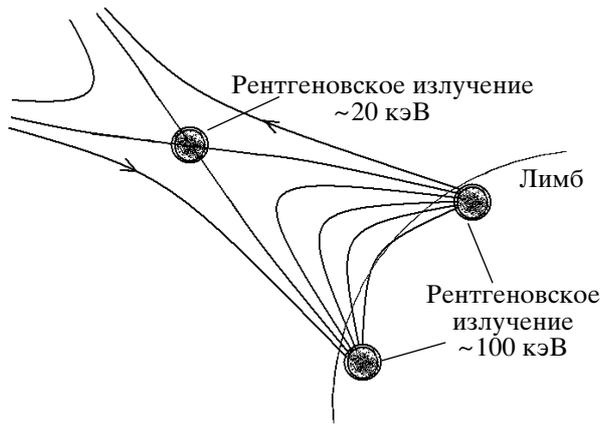


Рис. 2. Расположение центров жесткого рентгеновского излучения, зарегистрированных на аппарате RHESSI во время вспышек вблизи лимба. Наложены линии магнитного поля, соответствующие модели вспышки.

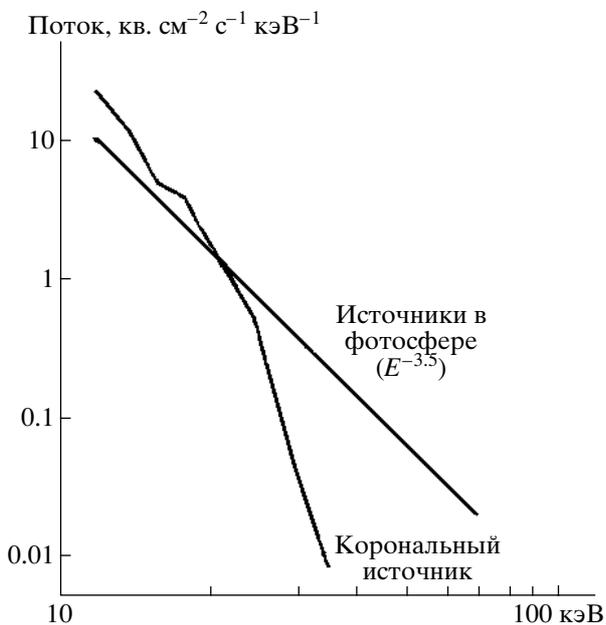


Рис. 3. Примеры спектров жесткого рентгеновского излучения из коронального источника и из подножья вспышечной петли (по данным RHESSI).

4. ЭНЕРГИЯ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Проведение рентгеновских измерений позволило получить принципиально новую информацию о физике вспышки. Дело в том, что видимый диапазон ($h\nu < 4$ эВ) практически не пригоден для изучения состояния плазмы короны при вспышке, когда электронная температура превышает 1 кэВ.

Резкое нагревание плазмы было зарегистрировано рентгеновским телескопом на японском аппарате *Yohkoh* во время вспышки 13.01.92, наблю-

даемой на лимбе. Источник рентгеновского излучения располагался над вершиной арки в окрестности особой линии X-типа там, где в результате диссипации энергии магнитного поля происходит нагревание плазмы [33]. Тепловое рентгеновское излучение этого источника отвечает электронной температуре ~ 10 кэВ и концентрации $\sim 10^{11}$ см $^{-3}$.

Рентгеновские исследования на аппарате RHESSI (рис. 2) отчетливо показали три центра рентгеновского излучения, возникающего при вспышке [34, 35]. Два пятна жесткого рентгеновского излучения регистрируются на краю солнечного диска, а третий источник излучения расположен над лимбом, т.е. находится в короне. Именно там, согласно электродинамической модели, должен располагаться источник излучения, возникший из-за нагревания плазмы при пересоединении в ТС. Его излучение носит тепловой характер и отвечает температуре ~ 10 кэВ.

Другие два источника располагаются по обе стороны от коронального источника на поверхности Солнца — там, где должны находиться подножья магнитной петли. Энергия излучения обоих источников на поверхности Солнца достигает ~ 100 кэВ. Спектр является нетепловым. Он имеет степенной вид, что отвечает торможению электронного пучка на толстой мишени. Именно такой сценарий вспышки соответствует электродинамической модели. Пучки быстрых электронов должны возникать при ускорении в продольных токах, и электроны, двигаясь вдоль линий магнитного поля, должны высыпаться на поверхность Солнца. Типичное расположение источников рентгеновского излучения при вспышке в районе лимба, согласно измерениям на RHESSI, показано на рис. 2. Примеры спектров излучения коронального источника и двух хромосферных источников в основаниях петель представлены на рис. 3.

Измеренные по рентгеновскому излучению во время вспышки 13.01.92 значения концентрации $n \sim 10^{11}$ см $^{-3}$ и электронной температуры $T_e \sim 10^3$ эВ вспышечного коронального источника [33] позволяют сделать грубые оценки запасенной в магнитном поле ТС энергии к моменту вспышки и нижнего предела толщины ТС. Из баланса давлений $\frac{B^2}{8\pi} = nkT$ следует, что магнитное поле ТС было в это время $B \sim 65$ Гс. По-видимому, объем, занимаемый полем ТС, не превышает L^3 , где L — размер активной области. При $L \sim 10^{10}$ см 3 получим энергию магнитного поля $\frac{B^2}{8\pi} L^3 \sim 10^{32}$ эрг, которая может выделиться при вспышке.

Из уравнения $\text{rot}\mathbf{V} = \frac{4\pi\mathbf{j}}{c}$ имеем $j\delta \sim 100$ А/см, где δ — ширина слоя. Максимально возможное j

определяется пороговым значением токовой скорости из-за развития ионно-звуковой неустойчивости $V_d = \sqrt{\frac{kT_e}{m_i}}$ (m_i — масса ионов). При измененных значениях $n = 10^{11} \text{ см}^{-3}$ и $T_e = 10^3 \text{ эВ}$ получим $j \sim 0.5 \text{ А/см}^2$, а минимально возможное значение δ при быстром пересоединении составляет около 200 см.

5. СВЯЗЬ ВСПЫШКИ И КОРОНАЛЬНОГО ВЫБРОСА МАССЫ

Долгое время связь вспышки с корональным выбросом подвергалась в ряде работ сомнению [41], однако другие авторы считали такие выводы ошибочными [42]. Сомнения возникали из-за различия в условиях наблюдения. Вспышка хорошо наблюдается на диске Солнца, а выброс корональной массы лучше всего наблюдать тогда, когда он происходит вблизи лимба. В настоящее время имеются неоспоримые доказательства, во всяком случае, для мощных вспышек, появления вспышки и коронального выброса в едином процессе. На это указывает как статистическая обработка частоты появления этих явлений [43], так и одновременная регистрация обоих явлений в одном и том же месте [44].

6. ЛОКАЛИЗАЦИЯ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Сравнение результатов расчета конфигурации магнитного поля над активной областью с результатами радиоизмерений на длине волны 5.2 см было выполнено в работе [38]. Использована активная область АО 0365, имевшая не очень сложное распределение поля, которая дала вспышку 27 мая 2003 г. В МГД-расчетах для задания начальных и граничных условий впервые непосредственно применялись карты компоненты магнитного поля, направленной вдоль луча зрения, в фотосфере, а не аппроксимация фотосферного поля полями диполей или зарядов. Для задания граничных условий необходимо иметь распределение полного вектора магнитного поля в фотосфере. Однако в нашем распоряжении имелись только данные для компоненты магнитного поля вдоль луча зрения, полученные на SOHO MDI (<http://soi.stanford.edu/magnetic/index5.html>). Поэтому параллельные фотосфере компоненты магнитного поля определялись из потенциального поля, вычисленного по распределению компоненты магнитного поля вдоль луча зрения в фотосфере. Такое приближение допустимо из-за расположения ТС высоко над фотосферой, так что его магнитное поле не сильно изменяет распределение поля в фотосфере. Для этой цели численно решалось

уравнение Лапласа с наклонной производной в качестве граничного условия.

Конфигурация магнитного поля в короне в АО 0365 содержит несколько особых линий, в окрестности которых может образовываться ТС в результате фокусировки возмущений. Здесь мы ограничимся рассмотрением только той особой линии, в окрестности которой появился наиболее мощный ТС и проведем результаты сравнения с самым мощным импульсом радиоизлучения, зарегистрированным 27 мая 2003 г. на радиотелескопе ССРТ на длине волны 5.2 см. Наибольшее увеличение яркостной температуры дала вспышка, произошедшая в момент 02 : 53 : 28.54 UT. При этом максимальная яркостная температура составляла $1.24 \times 10^7 \text{ К}$. Распределение интенсивности радиоизлучения активной области АО 0365 27 мая 2003 г. в картинной (перпендикулярной лучу зрения) плоскости в момент 02 : 53 : 28.54 UT, наложенное на магнитограмму компоненты магнитного поля вдоль луча зрения, изображено на рис. 4б. Здесь использованы данные SOHO MDI (<http://soi.stanford.edu/magnetic/index5.html>). Гелиоцентрические координаты области максимальной яркостной температуры, отмеченной косым крестиком на рис. 4б, составляют S6.58 W5.97. Гелиоцентрические координаты положения особой точки расчетной области в том месте, где ТС наиболее четко выражен (в координатах расчетной области это $x = 0.25, y = 0.25, z = 0.6$), в момент 02:53:28.54 составляют S7.541 W4.692. Координаты расчетной области были выбраны следующим образом. В качестве безразмерной единицы длины принимался размер активной области $L_0 = 1.2 \times 10^{10} \text{ см}$. Ось Y направлена от Солнца перпендикулярно фотосфере. Оси X и Z лежат в плоскости фотосферы: ось X направлена с востока на запад, а ось Z — с севера на юг. Для сравнения рядом с распределением интенсивности радиоизлучения, наложенного на магнитограмму (рис. 4б), на рис. 4а приведено изображение изолиний нормальной компоненты магнитного поля, рассчитанного в потенциальном приближении, на плоскости фотосферы. На обеих картах на рис. 4 отмечено положение вспышки (рис. 4б — положение максимума интенсивности радиоизлучения, рис. 4а — проекция по нормали точки ($x = 0.25, y = 0.25, z = 0.6$) на плоскость фотосферы).

Расхождение положений вспышки, полученных из радионаблюдений и МГД-моделирования, не превосходит 1° . Это меньше ошибки расчета и определения координаты на диске Солнца. Таким образом, рассчитанная в численном МГД-эксперименте конфигурация магнитного поля и измеренное по радиоизлучению положение макси-

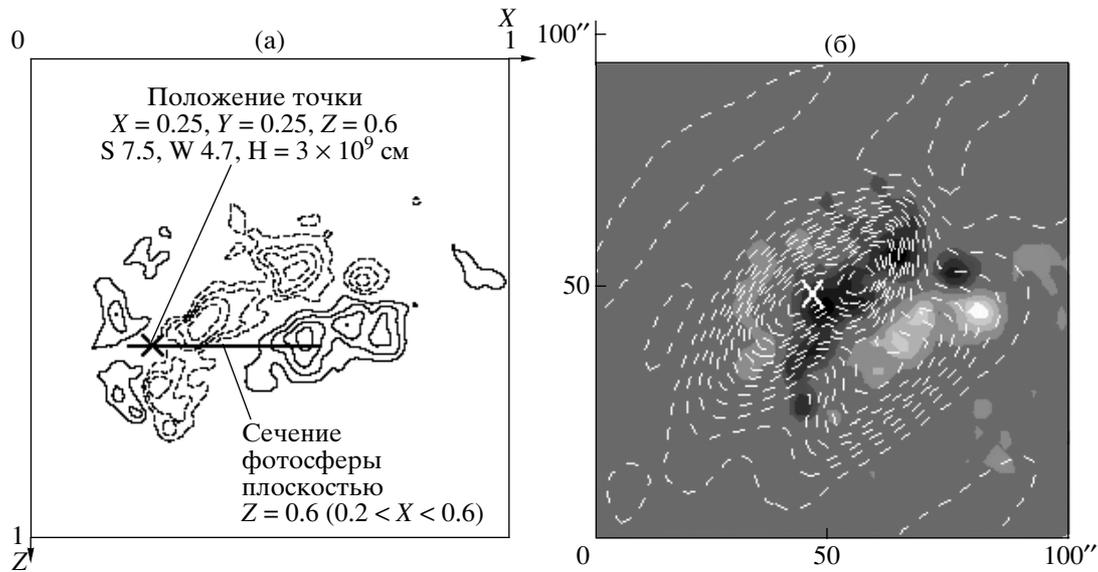


Рис. 4. (а) — Изолинии нормальной компоненты магнитного поля (штриховые линии соответствуют отрицательным значениям) на фотосферной границе расчетной области; крестиком обозначено положение точки ($x = 0.25$, $y = 0.25$, $z = 0.6$). (б) — Распределение интенсивности радиоизлучения, наложенное на магнитограмму вспышки 27.05.03 в момент 02 : 53 : 28.54 UT; крестиком обозначено положение максимума яркостной температуры (гелиоцентрические координаты этой точки составляют S6.58 W5.98).

муна энерговыделения указывают на диссипацию энергии при вспышке в ТС.

7. СПЕКТР СОЛНЕЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

Независимая информация о физике вспышки была получена из анализа спектра релятивистских протонов [36]. Полная длительность потока вспышечных протонов составляет более часа, в то время как длительность γ -излучения обычно составляет около 10 мин. Это значит, что “быстрые” протоны, вызывающие ядерные реакции на Солнце, которые сопровождаются γ -излучением, генерируются вблизи Солнца только во время взрывного энерговыделения при вспышке. Эта “быстрая” компонента приходит к Земле, двигаясь вдоль линий межпланетного магнитного поля, имеющих форму спирали Архимеда. Потоки протонов с энергией до 10 ГэВ регистрируются на поверхности Земли сетью нейтронных мониторов. Быстрая компонента начинает регистрироваться на орбите Земли с запаздыванием около 12 мин после вспышки. Задержка соответствует пролетному времени вдоль линий спирали Архимеда межпланетного магнитного поля. Заряженные частицы движутся в межпланетном поле так, чтобы их ведущий центр находился на линии магнитного поля. Таким образом, спектр быстрой компоненты несет информацию о механизме ускорения во вспышке. Запаздывание приходящего позже “медленного” потока солнечных космических лучей, по-видимому, обусловлено

процессом диффузионного переноса и (или) ускорением протонов в образующейся мощной ударной волне на начальной стадии ее возникновения.

Механизм ускорения, формирующий быструю компоненту релятивистских протонов, согласно электродинамической модели, состоит в следующем. При скорости пересоединения $V_{in} \sim 10^7$ см/с и магнитном поле токового слоя $B_{cs} \sim 300$ Гс протоны дрейфуют в скрещенных электрическом ($E = V_{in} B_{cs}/c$) и неоднородном магнитном поле к слою. Распределения тока и магнитного поля для слоя конечных размеров показаны на рис. 5а. Эти распределения показаны в плоскости поперечного сечения слоя, проходящей через нейтральную линию магнитного поля. В скрещенных постоянных полях E и B_{cs} частица дрейфует со скоростью $\mathbf{V} = c \frac{\mathbf{E} \times \mathbf{B}}{B^2}$. Одновременно она дрейфует в неоднородном магнитном поле со скоростью

$$\mathbf{V}_B = \frac{mc(V_{\perp}^2 + 2V_{\parallel}^2)}{2eB^3} \mathbf{B} \times \nabla B.$$

Траектории этих дрейфов, а также траектория, получающаяся в результате сложения обоих дрейфов, показаны на рис. 5б. При таком дрейфовом движении к слою $(\mathbf{V}_D \mathbf{E}) < 0$, т.е. частица, сохраняя адиабатический инвариант W_{\perp}/B , теряет свою тепловую энергию. На расстоянии порядка ларморовского радиуса от нейтральной линии адиабатичность движения нарушается, и частица начинает быстро набирать энергию, двигаясь вдоль электрического поля. Под действием нормальной к

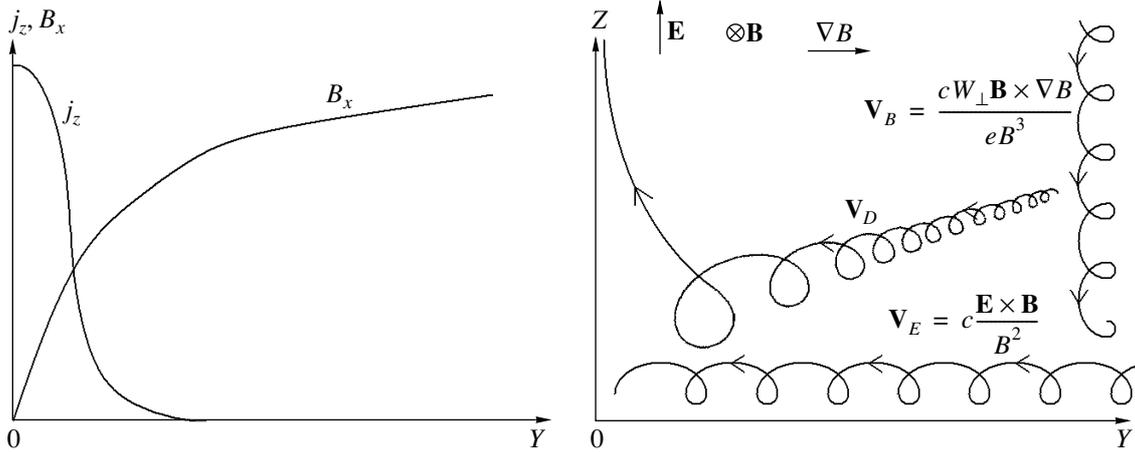


Рис. 5. (а) — Распределения плотности тока и магнитного поля токового слоя поперек слоя. (б) — Дрейфовые траектории протонов в скрещенных электрическом и магнитном полях и в неоднородном магнитном поле и результирующий дрейф в плоскости, поперечной слою и проходящей через нейтральную линию.

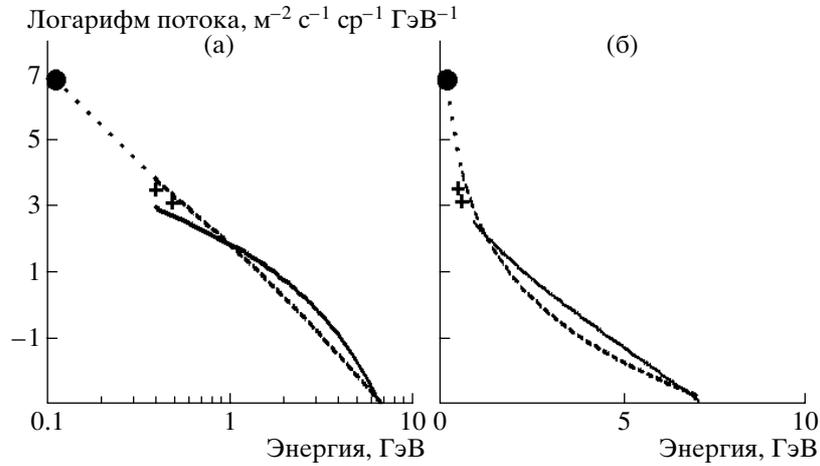


Рис. 6. Спектры солнечных космических лучей для быстрой и запаздывающей (штриховая линия) компонент при логарифмической (а) и линейной (б) шкале энергии [36]. (Крестиками и кружком нанесены данные прямых измерений солнечных протонов соответственно на шарах-зондах и КА GOES-11.)

слою компоненты магнитного поля частица, двигающаяся не точно вдоль нейтральной линии, может отклониться и начать дрейфовать в направлении, перпендикулярном плоскости рисунка. Но здесь в ТС направление дрейфа в неоднородном магнитном поле совпадает с направлением электрического поля, и частица продолжает набирать энергию (здесь $(\mathbf{V}_D \mathbf{E}) > 0$). Однако скорость набора энергии дрейфующей таким образом частицы на несколько порядков величины меньше скорости набора энергии при движении вдоль нейтральной линии, поэтому вклад ускорения при дрейфовом движении для релятивистских частиц получается малым. Время набора энергии релятивистскими протонами в электрическом поле в окрестности нейтральной линии на 2–3 порядка величины мень-

ше характерного времени вспышки, поэтому при расчете формирования их спектра нет необходимости учитывать динамику изменения конфигурации токового слоя.

Спектр релятивистских протонов, сопровождающих вспышку, исследовался по данным международной сети нейтронных мониторов [36, 37]. В зависимости от расположения на Земле нейтронных мониторов, они регистрируют нейтроны, рождаемые в атмосфере протонами, которые пришли к Земле в данный момент времени и которые имели различную энергию. При этом частица с определенной энергией, регистрируемая каждым монитором, приходит к границе магнитосферы под определенным углом. Угол прихода определяется движением частицы в межпланетном магнитном

поле. Траектории частиц данной энергии с данным углом прихода, регистрируемых станцией, рассчитываются для магнитного поля, соответствующего стандартной модели магнитосферы. Таким образом, вся сеть нейтронных мониторов (~30 станций) работает как многоканальный энергоспектрометр. На рис. 6а, 6б представлены спектры быстрой и запаздывающей на 30 мин (штриховая линия) компонент солнечных космических лучей во время вспышки 14.07.2000. Из сравнения спектров, представленных в полулогарифмическом и двойном логарифмическом масштабах, следует, что спектр быстрой компоненты является экспоненциальным, а спектр запаздывающей компоненты — степенным. Эти данные показывают, что спектр протонов, ускоренных непосредственно во вспышке, имеет экспоненциальный спектр. Такой спектр получается и в численном эксперименте, моделирующем ускорение в электрическом поле, направленном вдоль нейтральной линии магнитного поля [36]. Таким образом, экспоненциальный спектр быстрой компоненты солнечных космических лучей является еще одним аргументом в пользу электродинамической модели вспышки.

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. МГД-моделирование показало образование токового слоя и накопление в его магнитном поле энергии над активной областью в предвспышечном состоянии, достаточной для вспышки. Для задания начальных и граничных условий использовались данные магнитных измерений на уровне фотосферы в предвспышечном состоянии. Никаких специальных предположений о характере протекающих процессов не делалось.

2. Данные эксперимента RHESSI показали, что рентгеновское излучение в подножьях вспышечной петли вызвано пучками высыпавшихся электронов с энергией, значительно превышающей энергию теплового излучения из короны, генерируемого в области пересоединения.

3. Экспоненциальный спектр солнечных космических лучей, возникающий непосредственно во время вспышки, указывает на ускорение протонов в электрическом поле, приложенном вдоль особой линии магнитного поля.

4. Совпадение положения максимума плотности тока, полученного из МГД-моделирования, с положением максимума интенсивности радиоизлучения является прямым доказательством механизма солнечной вспышки, основанного на токовом слое в короне.

5. Одновременное появление коронального выброса, возникновение импульса релятивистских протонов и вспышки указывают на единый взрывной процесс, вызывающий эти явления.

Все эти данные согласуются со сценарием развития вспышки, описываемым электродинамической моделью, основанной на медленном накоплении энергии над активной областью в поле токового слоя и ее взрывном выделении.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 06-02-16006).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. E. Hiei and A. J. Hundhausen, *Magnetodynamic Phenomena in the Solar Atmosphere*, eds Y. Uchida, T. Kosugi, and S. Hudson (Kluwer Acad. Publ., 1996), p. 125.
2. J. Zhang, K. P. Dere, R. A. Howard, et al., *Astrophys. J.* **599**, 452 (2001).
3. С. И. Сыроватский, *Письма в Астрон. журн.* **2**, 293 (1976)
4. A. Bratenahl and W. Hirsch, *Amer. Phys. Soc.* **11**, 580 (1966).
5. Б. В. Сомов, С. И. Сыроватский, *Тр. Физ. ин-та им. П.Н. Лебедева*, **74**, 14 (1974).
6. V. V. Somov, *Physical processes in solar flares* (Kluwer Acad. Publ., Dordrecht, Holland, 1992).
7. К. В. Брушлинский, А. М. Заборов, С. И. Сыроватский, *Физ. плазмы* **6**, 297 (1980).
8. А. И. Подгорный, С. И. Сыроватский, *Физ. плазмы* **7**, 1055 (1981).
9. A. I. Podgorny, *Solar Phys.* **156**, 41 (1995).
10. A. I. Podgorny and I. M. Podgorny, *Solar Phys.* **139**, 125 (1992).
11. А. И. Подгорный, И. М. Подгорный, *Астрон. журн.* **78**, 71 (2001).
12. M. Podgorny, A. I. Podgorny, and S. Minami, *Astron. and Astrophys. Trans.* **22**, 585 (2003).
13. А. И. Подгорный, И. М. Подгорный, *Журн. вычисл. матем. и матем. физ.* **44**, 1873 (2004).
14. T. G. Forbes, J. M. Malherbe, and E. R. Priest, *Solar Phys.* **120**, 258 (1989).
15. J. Lin, *Solar Phys.* **219**, 469 (2004).
16. А. Б. Северный, *Изв. Крымск. астрофиз. обсерв.* **33**, 34 (1965).
17. Л. А. Арцимович и др., *Атомн. энергия* **1**(3), 84 (1956).
18. И. М. Подгорный, Н. Г. Ковальский, М. М. Степаненко, *Журн. эксперим. и теор. физ.* **38**, 1439 (1960).
19. H. Alfvén and G. Arrhenius, *Evolution of the Solar system* (Washington, NASA, 1976).
20. V. V. Zaitsev and V. V. Stepanov, *Solar Phys.* **39**, 343 (1992).
21. B. Kliem, V. S. Titov, and T. Torok, *Astron. and Astrophys.* **413**, L23 (2004).
22. В. С. Соколов, В. С. Славин, А. Г. Косовичев, *Год солнечного максимума* (АН СССР, М., 1981), с. 211.
23. J. A. Linker, G. Van Hoven, and D. D. Schnack, in *Physics of Magnetic Flux Ropes*, Geophys. Monogr. AGU. **58** (1990), p. 378.

24. А. И. Подгорный, И. М. Подгорный. *Астрон. журн.* **76**, 696 (1999).
25. T. V. Losseva, I. B. Kosarev, S. I. Popel, I. V. Nemtchinov, in *Asteroids, Comets, Meteors*, Proc. Conf. Techn. Univ. Berlin, Germany, ESA-SP-500 (2002), p. 873.
26. T. Amari, J. F. Luciani, Z. Mikic, and J. J. Linker, *Astrophys. J.* **529**, L49 (2000).
27. T. G. Forbes, *Geophys. Fluid Dynamics* **63**, 15 (1991).
28. Z. Mikic, D. C. Barnes, and D. D. Schnack. *Astrophys. J.* **328**, 830 (1988).
29. A. I. Podgorny, *Solar Phys.* **123**, 285 (1989).
30. T. Yokoyama and K. Shibata. *Astrophys. J.* **459**, L113 (1998).
31. D. E. McKenzie and H. S. Hudson, *Earth, Planets, Space* **53**, 577, 2001.
32. S. Masuda, T. Kosugi, H. Hara, et al., *Nature* **371**, 495 (1994).
33. S. Tsuneta, S. Masuda, T. Kosugi, et al., *Astrophys. J.* **478**, 787 (1997).
34. S. Krucker, http://sprg.ssl.berkeley.edu/krucker/hessi/clean_real.html.
35. R. P. Lin, S. Krucker, G. J. Hurford, et al., *Astrophys. J.* **595**, L69 (2003).
36. Ю. В. Балабин, Э. В. Вашенюк, О. В. Мингалев, и др., *Астрон. журн.* **82**, 940 (2005).
37. И. М. Подгорный, Э. В. Вашенюк, А. И. Подгорный, в *Труды Пулковского семинара по физике Солнца* (2005, в печати).
38. И. М. Подгорный, А. И. Подгорный, Н. С. Мешалкина, в *Труды Пулковского семинара по физике Солнца* (2005, в печати).
39. А. И. Подгорный, И. М. Подгорный, И. А. Биленко. *Изв. РАН, сер. физ.* **67**, 406 (2003).
40. I. A. Bilenko, A. I. Podgorny, and I. M. Podgorny, *Solar Phys.* **207**, 323 (2002).
41. J. T. Gosling, *J. Geophys. Res.* **98**, 18937 (1993).
42. M. Dryer, *Solar Phys.* **168**, 421 (1996).
43. Chin-Teh Yen, M. D. Ding, and P. F. Chen, in *Proceedings of the IAU 8th Asian-Pacific Regional Meeting* (2002), Vol. 2, p. 471.
44. J. Zhang, K. P. Dere, R. A. Howard, et al., *Astrophys. J.* **599**, 452 (2001).

A Model of a Solar Flare: Comparisons with Observations of High-Energy Processes

A. I. Podgorny and I. M. Podgorny

New data for the energy and location of the hard-emission centers of a solar flare agree with an electrodynamic model of a solar flare, based on the idea of the accumulation of free magnetic energy in the field of a current sheet. Three-dimensional MHD simulations are used to show that the energy stored in the pre-flare magnetic field of the current sheet is sufficient for the development of a flare and a coronal mass ejection. The flare and coronal mass ejection result from the explosive decay of the current sheet. The position of the brightness-temperature maximum of the radio emission during the flare coincides with the maximum of the current in the current sheet. The exponential spectrum of relativistic protons generated during the flare is consistent with acceleration by the electric field during the current-sheet decay.