

УДК 523.98

МОЩНЫЕ СОЛНЕЧНЫЕ ВСПЫШКИ И ВЫБРОСЫ КОРОНАЛЬНОЙ МАССЫ: ХРОМОСФЕРНЫЕ ПРОЯВЛЕНИЯ

^{1,2}В.И. Сидоров, ^{1,2}С.А. Язев

ENERGETIC SOLAR FLARES AND CORONAL MASS EJECTIONS: CHROMOSPHERIC MANIFESTATIONS

V.I. Sidorov, S.A. Yazev

Приведено краткое описание феноменологической модели единого события солнечная вспышка – корональный выброс массы (КВМ), основанной на анализе изображений развития ряда событий в разных спектральных диапазонах. Данная модель описывает явления в процессе развития мощных солнечных событий типа вспышка + КВМ. Модель построена на основе данных наблюдений ряда крупных вспышек (16.05.1981, 23.08.1998, 14.07.2000, 9.04.2001, 19.10.2001, 23.07.2002). Предложена модифицированная классификация хромосферных проявлений события.

A brief description of phenomenological model of a single event solar flare – coronal mass ejection (CME) is given. This model is based on the analysis of images of series of events in different spectral ranges. It describes phenomena that occur in the process of development of flare+CME-type energetic solar events. The model has been constructed using data from observations of series of large flares (16.05.1981, 23.08.1998, 14.07.2000, 9.04.2001, 19.10.2001, 23.07.2002). A modified classification is proposed of chromospheric manifestations of events.

Выделяются следующие морфологические особенности вспышки на уровне хромосферы.

Вспышечные ленты (ВЛ) – наблюдаемая в свете хромосферных линий типичная для крупных вспышек биполярная структура из двух ярких вспышечных лент, расходящихся по мере развития вспышки (скорость распространения «фронта» ВЛ до 0.005 Мм/с [1]). На постмаксимальной фазе вспышки наблюдается система арок, соединяющих ВЛ.

Структуры на концах вспышечных лент (СКВЛ) – эмиссионные вспышечные образования, быстро меняющие яркость и форму [2–4]. Задолго до окончания H α -вспышки контраст центральных частей СКВЛ падает до уровня невозмущенной хромосферы, в результате чего СКВЛ трансформируются в квазикольцевые структуры, обрисовывающие границы ячеек хромосферной сетки (рис. 1, 2, а).

Периферийные структуры (ПС) – вспышечные эмиссионные образования на периферии активной области (АО), отличающиеся морфологией и яркостью от ВЛ [5]. ПС начинают развиваться на месте угасающих СКВЛ. Процесс выглядит как структуризация (рост компактности и яркости) тонких цепочек флоккулов, трассирующих границы ячеек усиленной хромосферной сетки на периферии АО. Формируются тонкие двойные эмиссионные полосы (ПС), их ширина – 1.5–2 Мм, что меньше ширины ВЛ (порядка

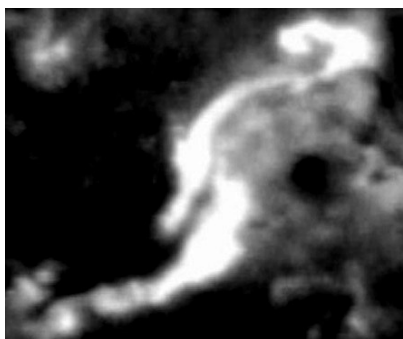


Рис. 1. Вспышка 16.05.1981 г., в верхней части – развитие СКВЛ.

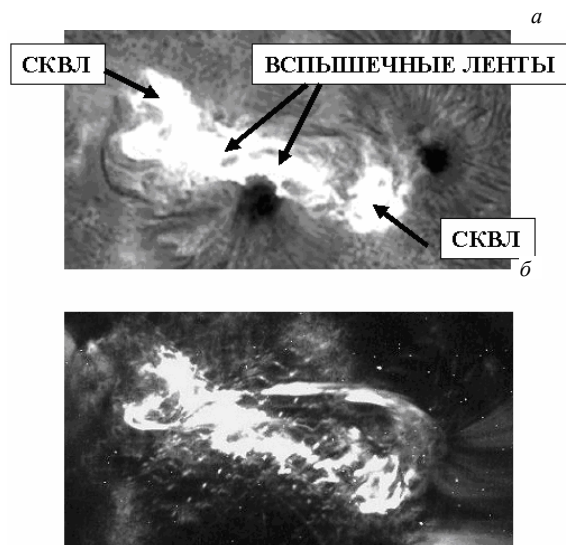


Рис. 2. Вспышка 19 октября 2001 г. на предмаксимальной стадии развития: а – картина в линии H α (обсерватория «Big Bear»), б – в диапазоне 171 Å КА «TRACE».

10 Мм). Расстояние между полосками – от 2 до 10 Мм. Двойная полоска быстро вытягивается, распространяясь вдоль флоккулов со скоростью до 0.6 Мм/с. Максимальная яркость наблюдается во внешней (по отношению к АО) узкой полоске ПС и в «голове» распространяющейся зоны эмиссии. Двойная полоска ПС наблюдается в зоне одного знака магнитного поля (МП).

Удаленные уярчения (remote brightenings, RB [6]). Уярчения эмиссионных узлов хромосферной сетки в H α на расстояниях порядка 100–200 Мм от АО во время вспышки.

На основе анализа изображений перечисленного выше ряда вспышек, наблюдавшихся как на диске, так и на лимбе, предложена топологическая модель единого события крупной вспышки и КВМ.

Первая стадия развития события

Аркада вспышечных арок, соединяющих ВЛ, соприкасается цепочкой вершин с квазицилиндрической оболочкой КВМ. Магнитное поле (МП) оболочки представляет собой набор спирально закрученных силовых линий. Внутри располагается осевой магнитный жгут – «хребтовая» арка КВМ. Основания жгута проявляются на уровне хромосферы в виде эмиссии СКВЛ. Вспышечные арки расположены под острым углом к линии раздела магнитных полярностей (ЛРП). В результате МП в вершинах арок антипараллельно полю в нижних точках оболочки КВМ. На линии соприкосновения вершин аркады и нижней поверхности КВМ, согласно [7], развивается токовый слой (ТС) – область пересоединения (рис. 3), которая является источником энергии для всего солнечного события. В рамках модели исходящие из ТС частицы расходятся в четырех направлениях. Частицы, ушедшие в КВМ, двигаются вдоль спиральных линий оболочки КВМ и попадают на внешний (верхний) фронт КВМ, где сталкиваются с уплотненной плазмой, вызывая эмиссию в жестком рентгеновском диапазоне (HXR). Часть потока частиц продолжает движение по спиральным траекториям вплоть до их хромосферных оснований

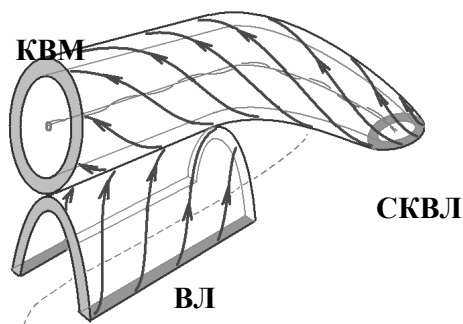


Рис. 3. Топологическая схема солнечного события вспышка-КВМ на ранней стадии развития.

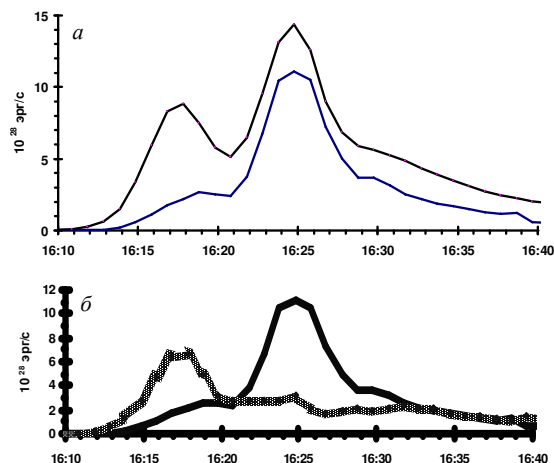


Рис. 4. Энергетическое выделение во вспышке 19.10.2001 г. (а): верхняя кривая – временной ход высвобождения энергии в токовом слое; нижняя – часть энергии, затраченная на вспышку, в том числе потери на излучение, нагрев области вспышки, потери за счет теплопроводности. Сопоставление предыдущего графика с ходом энергетического выделения, затрачиваемого на ускорение КВМ в нижней короне (б).

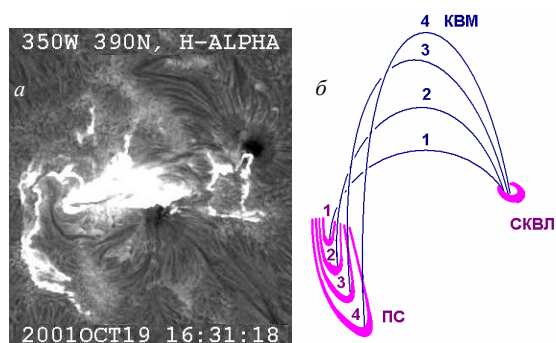


Рис. 5. Развитие периферийных структур во время вспышки (а) и предполагаемая схема системы СКВЛ – ПС (б).

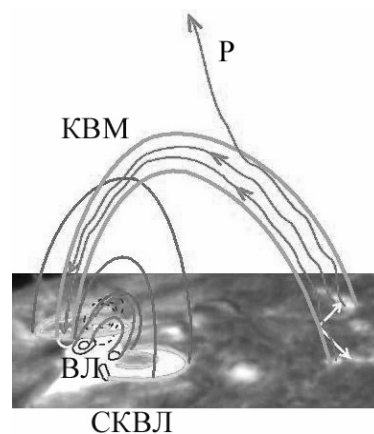


Рис. 6. Схема выхода солнечных протонов из области совместного развития вспышки и КВМ (на ранней стадии) в верхнюю корону. По магнитным аркам, соединяющим удаленные Na-урчения (RB) с гамма-источником, проходят пучки высокоэнергетических электронов к RB, затем обратно пучки протонов, вызывающие гамма-всплеск. Часть протонов прорывается из магнитных арок в вершине КВМ и уходит в гелиосферу (вспышка 23.07.02 [6]).

(СКВЛ). В итоге энергетическое выделение в ТС порождает шесть HXR-источников в шести пространственно-разнесенных точках хромосферы и короны. Расчеты, выполненные по методике [8], позволяют оценить соотношение вкладов энергии во вспышку и в КВМ примерно как 0.6 к 0.4 (см. рис. 4 и пояснения к нему).

Вторая стадия развития события

Вблизи фазы максимума вспышки начинается быстрое развитие ПС. Согласно модели, ПС суть хромосферные основания внешних оболочек КВМ: центральный жгут КВМ опирается на СКВЛ, а оплетающие его оболочки – на ПС (рис. 5). Развитие ПС выглядит как распространение (вытягивание) двойной полоски ПС с ярким, соединяющим полоски передним краем (фронтом), который быстро перемещается вдоль цепочки флоккулов (рис. 5, а). В каждый момент времени (кривые 1, 2, 3, рис. 5, б) фронт ПС как бы «вложен» внутри той же ПС, но рассматриваемой в более поздний момент времени (кривые 2, 3, 4...). Предполагается «вложенность» петель КВМ, опирающихся на ранее «засветившиеся» участки ПС, «внутри» петель КВМ, опирающихся на участки ПС, «засветившиеся» позднее.

На поздней стадии развития события вспышка–КВМ вдали от вспышечной АО наблюдается феномен RB. Согласно [6], RB могут при благоприятных условиях явиться источниками потока протонов, порождающих гамма-источники (в событии 23.07.2002 г. RB, видимо, явились источниками протонов, породивших гамма-всплеск вблизи ВЛ, поскольку последний с опозданием на минуту практически точно повторял световую кривую RB [6]). Согласно модели, потоки электронов, двигающиеся из АО по аркам поднимающегося КВМ к их дальним основаниям, вызывают в них ударный нагрев, проявляющийся в виде эффекта RB (рис. 6). В итоге отсюда вдоль тех же арок в противоположном направлении движутся ускоренные потоки протонов, порождающие гамма-источник в основаниях арок в АО. Часть потока протонов в районе вершин арок «прорывается» сквозь внешний фронт КВМ и уходит в межпланетное пространство (так модель, помимо прочего, указывает на возможную локализацию хромосферного источника протонов, попадающих в гелиосферу, а также на его топологическую связь с КВМ и гамма-источником во вспышке).

Вывод

Анализ данных наблюдений позволил выделить воспроизводимую в указанных выше солнечных событиях последовательность описанных явлений, подтверждающих положения предлагаемой модели либо, как минимум, не противоречащих им.

Работа поддержана программой Минобрнауки РФ «Развитие научного потенциала высшей школы», проект РНП 2.2.3.1.4833.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Комарова Е.С., Сидоров В.И., Язев С.А. Особенности развития солнечной вспышки 19 октября 2001 г. // Солнечно-земная физика. Изд-во СО РАН, 2004. Вып. 6. С. 90–92.
2. Банин В.Г., Федорова А.С. Сильная хромосферная вспышка 5 ноября 1970 г. // Исследования по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца. 1971. Вып. 2. С. 73–85.
3. Алтынцев А.Т., Банин В.Г., Куклин Г.В., Томозов В.М. Солнечные вспышки. М.: Наука, 1982. С. 32–34.
4. Heyvaerts I., Priest E.R., Rust D.M. An emerging flux model for the solar flare phenomenon: Preprint ASE-4025. Cambridge, 1976.
5. Комарова Е.С., Сидоров В.И., Язев С.А. Особенности развития солнечной вспышки 19 октября 2001 г. // Солнечно-земная физика. Изд-во СО РАН, 2004. Вып. 6. С. 90–92.
6. Yurchyshyn V., Wang H., Abramenko V., Spirock T., Krucker S. Magnetic field, $H\alpha$, and RHESSI observation of the 2002 July 23 gamma-ray flare // Ap. J. 2004. V. 605. P. 546–553.
7. Сомов Б.В. Физика солнечных вспышек // Земля и Вселенная. 2005. № 2. С. 4–13.
8. Сидоров В.И. Соотношение энергетики вспышки и коронального выброса массы 19 октября 2001 г. // Солнечно-земная физика. Изд-во СО РАН, 2004. Вып. 8. С. 71–72.

¹Астрономическая обсерватория ГОУ ВПО ИГУ, Иркутск

²Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск