



УДК 523.98

## **О топологии выбросов коронального вещества в мощных вспышечных событиях на Солнце**

В. И. Сидоров ([yamari@yandex.ru](mailto:yamari@yandex.ru))

Г. Н. Кичигин ([king@iszf.irk.ru](mailto:king@iszf.irk.ru))

С. А. Язев ([uustar@star.isu.ru](mailto:uustar@star.isu.ru))

**Аннотация.** Использование данных многоволновых наблюдений Солнца с привлечением изображений в хромосферных линиях позволяет диагностировать динамическую картину на ранней стадии развития выброса коронального вещества (ВКВ) в мощных вспышечных событиях. Такие события, как правило, отличаются высокой геоэффективностью. На девяти случаях показано, что для топологии ВКВ характерны значительная асимметрия хромосферных оснований и различия в проявлениях до и после фазы импульсного ускорения. Показаны характерные отличия эмиссии в хромосферных основаниях ВКВ от эмиссии в лентах вспышки. На примере события 23 июля 2002 г. предложен механизм генерации энергичных ионов в магнитных арках ВКВ, объясняющий возникновение гамма-источника и хромосферной эмиссии в удаленных основаниях коронального выброса.

**Ключевые слова:** солнечная вспышка, выброс коронального вещества, топология, геоэффективность, тонкая структура хромосферы.

### **Введение**

Известно, что крупные солнечные вспышки и корональные выбросы вещества являются самыми мощными явлениями на Солнце, обладающими наиболее высоким геоэффективным потенциалом. На протяжении длительного времени вспышки наблюдались почти исключительно в свете хромосферных линий. Исследования феномена вспышек в линии Н-альфа показали, что морфологически крупная вспышка в большинстве случаев выглядит как динамичное образование, состоящее из двух квазипараллельных эмиссионных полос (вспышечных лент), располагающихся по разные стороны линии раздела полярностей продольного компонента магнитного поля. Давно показано, что ленты представляют собой светящиеся цепочки оснований магнитных арок, подобно тоннелю, выстроенных над линией раздела полярностей. Эмиссия лент, согласно классическим вариантам модели вспышки, восходящей к 1960-м гг., вызывается ударными столкновениями частиц, двигающихся по магнитным аркам, с веществом хромосферы. Наблюдения в коротковолновом диапазоне спектра, развернутые, начиная с последней четверти XX в., на внеатмосферных обсерваториях, в

целом подтвердили арочную структуру динамических образований, формирующихся либо активизирующихся во время вспышки.

Использование телескопов со все более высоким пространственным разрешением (порядка 1 arcsec) показало, что структура вспышки только в первом приближении может описываться латеральной двухленточной структурой. С одной стороны, появлялись работы, в которых были указания на трехленточные [14; 15] и даже четырехленточные [5] вспышки. Становилось ясно, что структура эмиссионных образований вспышки богаче и разнообразнее, что нельзя пренебрегать яркими деталями, которые пространственно не связаны с лентами, но по особенностям динамики развития и временному ходу яркости явно относились к разряду вспыхивающих явлений в пределах активной области [3]. С другой стороны, даже наблюдения с невысоким пространственным разрешением показывали, что подчас возмущения тонкой структуры хромосферы, включая уярчения узлов хромосферной сетки и элементов флоккулов, происходили синхронно со вспышкой на гигантских расстояниях (порядка радиуса Солнца) от вспыхивающей активной области, причем в отдельных случаях в другом полушарии. То обстоятельство, что подобные процессы наблюдались исключительно во время крупных вспышек, позволяло предположить их связь, предположительно через высокие (не видимые в линии H-альфа) корональные петли.

Всеволновые внеатмосферные наблюдения, начатые в последней трети XX в., позволили выявить еще один класс мощных проявлений солнечной активности – выбросы коронального вещества (далее ВКВ). Наблюдаемые преимущественно за пределами солнечного диска, ВКВ поставили перед гелиофизиками серьезную задачу о локализации мест на солнечной поверхности, где начинали развиваться ВКВ. В ряде случаев эта задача решалась легко (в основном во время наблюдений вспышек вблизи лимба), место генерации ВКВ однозначно отождествлялось, и во многих работах было показано, что и вспышка, и ВКВ представляют собой единое сложное событие, охватывающее все слои солнечной атмосферы и в конечном итоге гелиосферу. В то же время статистика ВКВ показывает, что выбросы могут наблюдаться не только в отсутствие мощных вспышек, но даже в отсутствие крупных групп пятен на Солнце. Это означает, что классическое требование к наличию сильных магнитных полей активной области для генерации мощной вспышки и, тем более, мощной вспышки, сопровождаемой ВКВ, на самом деле не является достаточным условием. Кроме того, практически не удавалось обнаружить проявлений ВКВ в свете хромосферных линий и точно указать, где находятся основания огромного жгута из магнитных силовых трубок, развивающегося в ВКВ.

Таким образом, накапливался целый ряд отдельных фактов наблюдений, которые не укладывались в существующие модели солнечных вспышек. С другой стороны, и сами модели вспышек в большинстве своем исходят из явно упрощенной схемы, которая принципиально игнорирует другие эмиссионные элементы вспышек, кроме двух лент.

Исследование отдельных примеров наблюдений мощных вспышек с использованием хромосферных данных с высоким пространственным разрешением позволило авторам [10] предложить модификацию модели вспышки, сопровождаемой ВКВ. Основным элементом модели стала обновленная топологическая схема вспышки [10], опирающаяся на учет если не всех, то, по крайней мере, большего числа наблюдаемых вспышечных проявлений [7], которые ранее либо игнорировались, либо не получили интерпретации в рамках существовавших моделей. Модель позволила впервые отождествить некоторые типы хромосферных вспышечных явлений как проявления оснований ВКВ.

В настоящей работе, продолжающей цикл предыдущих исследований, рассмотрены данные ряда крупных вспышечных событий с использованием фильтрограмм в линии Н-альфа (таблица). События были интерпретированы с позиций концепции единства физических процессов, проявляющихся в одном событии и как вспышка, и как ВКВ.

Таблица

Крупные вспышечные события

| Дата<br>день мес. год | Балл<br>рентген/оптич. | ВКВ<br>км/с, тип | Данные<br>Н-альфа |
|-----------------------|------------------------|------------------|-------------------|
| 05.11.1970            | 3В                     | -                | БАО, Иркутск      |
| 02.08.1972            | X2/2В                  | -                | Palehia           |
| 04.08.1972            | >X5/3В                 | -                | Athens            |
| 07.08.1972            | >X5/3В                 | -                | Big Bear          |
| 13.05.1981            | 3В                     | -                | БАО, Иркутск      |
| 16.05.1981            | X1/3В                  | -                | БАО, Иркутск      |
| 14.07.2000            | X5.7/3В                | 1674 гало        | Huairou           |
| 19.10.2001            | X1.6/2В                | 901 гало         | Big Bear          |
| 23.07.2002            | X4.8/2В                | 2285 гало        | Big Bear          |

### Вспышка 19 октября 2001 г.

Крупная солнечная вспышка X1.6/2В 19.10.2001, с максимумом развития вспышки около 16.30 UT, наблюдавшаяся в активной области (далее АО) № 9661, сопровождалась быстрым выбросом коронального вещества (далее ВКВ) типа «гало».

Развитие вспышки, зарегистрированное с высоким разрешением обсерваторией Big Bear, подробно описано в работах [10; 7]. Следуя [10], выделим основные элементы вспышки (рис. 1).

**Вспышечные ленты (ВЛ).** Наблюдаемая в свете линии Н-альфа типичная для крупных вспышек биполярная структура из двух эмиссионных вспышечных лент, расходящихся по мере развития вспышки (скорость распространения «фронта» ВЛ – 1–5 км/с [7]. На постмаксимальной фазе вспышки наблюдается система арок, соединяющих ленты. Характерные значения контраста по отношению к уровню невозмущенной хромосферы в линии Н<sub>α</sub> – всегда более 130 %.

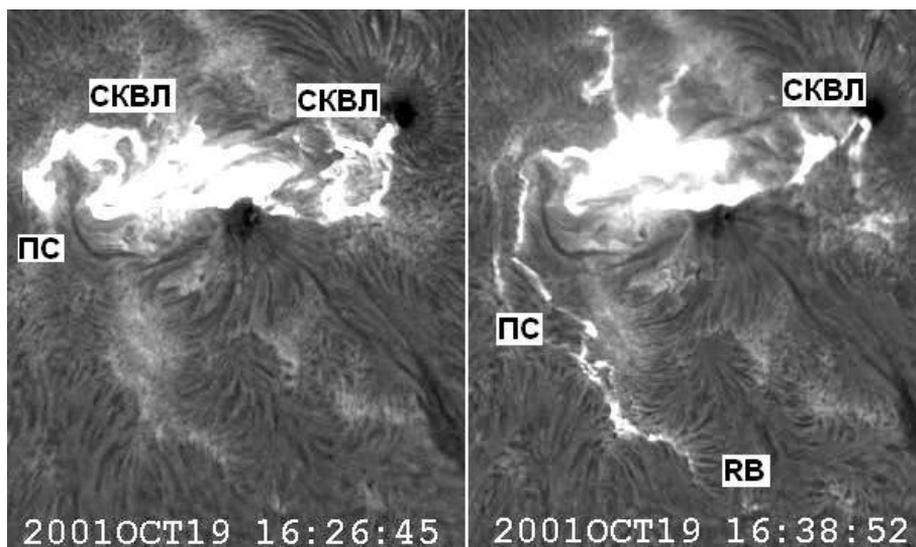


Рис. 1. Вспышка 19.10.2001. Фильтрограммы в линии Н-альфа (данные BBSO). Восток слева, север вверх. Левая панель – стадия роста вспышки, показаны СКВЛ и начало развития ПС. Видны в центре яркие вспышечные ленты. Правая панель – фаза максимального развития вспышки, показаны почти угасшие СКВЛ, мощные вспышечные ленты. Периферийные структуры заканчиваются несколькими узлами удаленных уярчений вспышки (RB)

**Структуры на концах вспышечных лент (СКВЛ).** Динамические эмиссионные образования, которые отличаются высокой яркостью и нерегулярной формой [3; 12, с. 32–34; 19]. Как правило, СКВЛ демонстрируют быстрые изменения яркости и формы, и задолго до окончания развития  $H_{\alpha}$ -вспышки угасают практически до уровня яркости невозмущенных флоккулов. Во вспышке 19.10.2001 конфигурация СКВЛ обрисовывала границы супергрануляционных ячеек на стадии начала развития ВЛ.

**Периферийные структуры (ПС).** Яркие эмиссионные образования на периферии АО, отличающиеся морфологией и яркостью от ВЛ. ПС начали развиваться на месте угасающих СКВЛ. Контраст центральных частей СКВЛ упал до уровня невозмущенной хромосферы, в результате чего СКВЛ трансформировались в квазиколецевые структуры, обрисовывавшие границы ячеек хромосферной сетки. После этого эмиссия стала быстро распространяться от «угасшей» восточной СКВЛ по соседним флоккулам. Процесс выглядел, как структуризация (рост компактности и яркости) тонких цепочек флоккулов, трассирующих границы усиленной хромосферной сетки на периферии активной области. В результате сформировались ПС в виде тонких двойных эмиссионных полосок. Их ширина – 1,5–2 тыс. км, что существенно меньше по сравнению с ВЛ, типичная ширина которых составила 7–10 тыс. км. Расстояние между полосками ПС – от 2 до 10 тыс. км [7]. Двойная полоска быстро вытягивалась, распространяясь вдоль флоккулов со средней скоростью 150 км/с, максимальное значение – около 600 км/с. Максимальная яркость наблюдалась во внешней (по отношению

к активной области) узкой полоске ПС и в «голове» распространяющейся зоны эмиссии. Существенно, что двойная полоска ПС наблюдалась в зоне одного знака магнитного поля.

Как показано в [10], в рамках развиваемой авторами концепции, СКВЛ интерпретируются как хромосферные основания формирующегося ВКВ на начальной стадии развития события. Динамичные двойные эмиссионные полосы ПС – также основания арочных структур ВКВ, развивающихся на постмаксимальной стадии вспышки, когда ВКВ после фазы импульсного ускорения движется со скоростью  $\geq 800$  км/с от солнечной поверхности. Доводы в пользу данной интерпретации приведены в [10].

Последовательная активизация магнитных арок ВКВ, опирающихся на хромосферные основания в виде СКВЛ и ПС, схематично представлена на рис. 2.

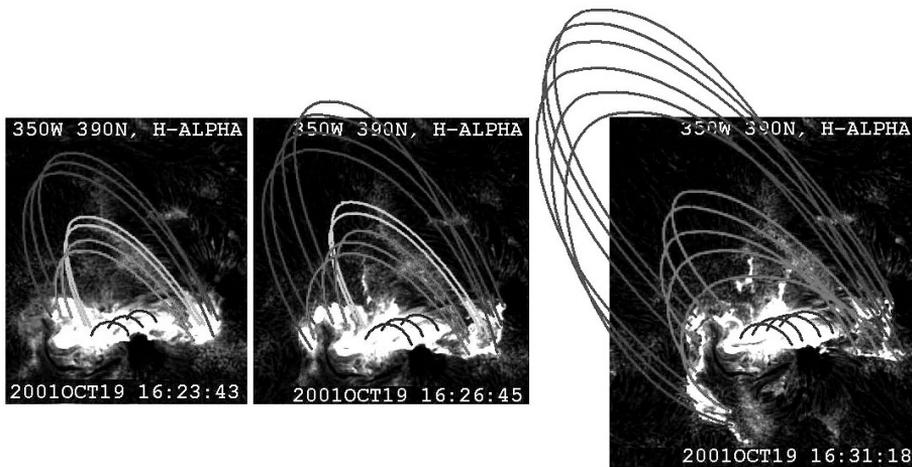


Рис. 2. Схема образования асимметричной топологии корональных арок в составе коронального выброса 19 октября 2001 г. Показаны низкие вспышечные петли, соединяющие эмиссионные ленты. Показано соответствие хромосферных элементов вспышки, ПС и СКВЛ, основаниям растущего ВКВ вблизи фазы его импульсного ускорения, определяемого по началу образования ПС

Низкие полуциркулярные вспышечные петли соединяют хромосферные вспышечные ленты, образуя аркаду над линией раздела полярностей вертикального магнитного поля. При расхождении лент происходит относительно медленный рост высоты вспышечной аркады. На центральные части СКВЛ опирается центральная часть крупномасштабного магнитного жгута, выброс которого инициирует развитие ВКВ. При его движении в короне, последовательно активизируются более внешние по отношению к жгуту корональные арки, опирающиеся на «бегущие» полосы периферийных структур. На рис. 2 схематично показано последовательное образование асимметричной структуры корональных арок ВКВ, которая веерообразно расходится в направлении ПС, в то время как в другом основании, западной СКВЛ, остается компактной.

Далее будет показано, что такие структуры, как СКВЛ и ПС, наблюдаются, согласно нашим данным, практически во всех крупных вспышках.

### Вспышка 5 ноября 1970 г.

В исследованной Баниным [3] мощной вспышке балла 3В 5.11.1970 (см. табл.) СКВЛ отчетливо проявляются на зарисовках, выполненных с фильтрограмм в линии Н-альфа (рис. 3). Западная СКВЛ округлой формы имела явную тенденцию к «выгоранию» изнутри (уменьшению яркости и площади области эмиссии), в результате чего сформировалась эмиссионная кольцеобразная структура. В это время ВЛ все еще продолжали увеличивать свою площадь. СКВЛ, имеющие кольцеобразную или спиралевидную форму, по-видимому, были впервые описаны Баниным в 1971 г. на примере данной вспышки. Согласно приведенной в монографии [12, с. 32–34] интерпретации, эмиссия в СКВЛ является следствием стекания вещества поднимающегося волокна в его хромосферные основания. Расположение волокна и его активизация во время вспышки не противоречат этой данной впоследствии Баниным интерпретации [12, с. 32–34].

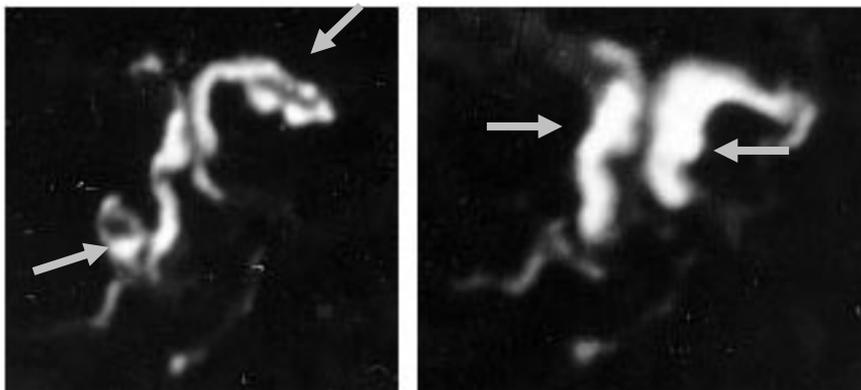


Рис. 3. Вспышка 05.11.1970 в линии Н-альфа. (Фото В. Д. Трифонова, Байкальская астрофизическая обсерватория (далее БАО) ИСЗФ СО РАН, [10]). Восток слева, север справа. На левой панели представлена импульсная фаза вспышки. Наклонными стрелками показаны СКВЛ. На правой панели – максимальное развитие вспышечных лент (показаны горизонтальными стрелками). Южная СКВЛ почти исчезла. Эмиссия северо-западной СКВЛ значительно уменьшилась

### Вспышки в августе 1972 г.

Серии мощных вспышек, наблюдавшихся 02.08.1972, 04.08.1972 и 07.08.1972 (см. табл.), посвящено много работ. У всех указанных вспышек [21], происшедших в одной активной области (АО), кроме двухленточной структуры, наблюдались «второстепенные» эмиссионные образования, проявлявшиеся, в значительной степени, в начале вспышки (рис. 4–5). На рис. 4 на примере вспышки 07.08.1972 показана характерная эволюция одной из СКВЛ спиральной формы. На левой панели приведена фильтрограмма в линии Н-альфа вспышки 02.08.1972, балл X2/2В в 20:31 UT (в

предмаксимальной стадии). Восток – слева, север – сверху. СКВЛ в виде спиралей или неправильных овалов показаны стрелками. Юго-западная компактная СКВЛ расположена в сильных магнитных полях солнечного пятна. Восточная СКВЛ более протяженная и локализована во флоккульных магнитных полях, обычно не превышающих нескольких десятков Гс. На правой панели – фильтрограмма в линии Н-альфа вспышки 04.08.1972, балл >X5/3В, 06:23 UT, также в предмаксимальной стадии. Восточная протяженная СКВЛ локализована во флоккульных магнитных полях, западная СКВЛ – в сильных полях пятен (показаны стрелками).

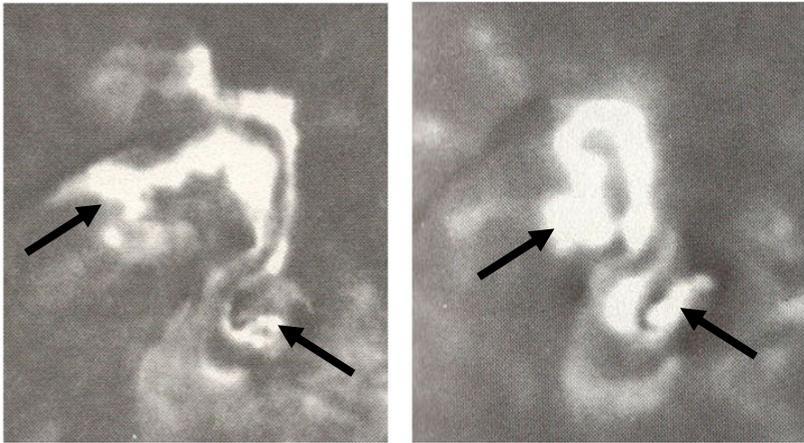


Рис. 4. Гомологичные вспышки 02.08.1972 г. и 04.08.1972 г.

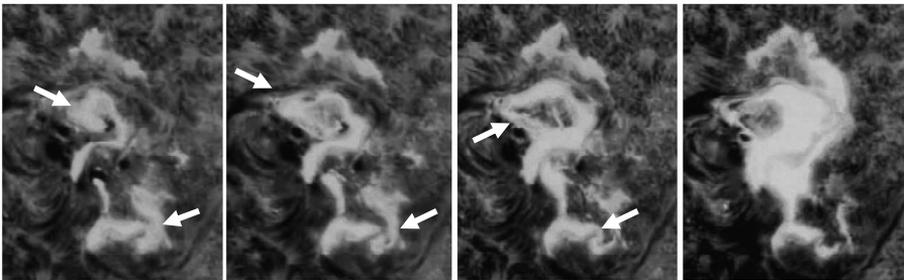


Рис. 5. Вспышка 07.08.1972, балл >X5/3В, обсерватория BBSO, в предмаксимальной и максимальной (правое изображение) стадии. Восток – слева, север –верху

На рис. 5 хорошо прослеживается эволюция северо-западной СКВЛ спиральной формы. Юго-западная СКВЛ имеет сложную форму, напоминающую неправильную спираль. СКВЛ обозначены стрелками. По мере развития вспышечных лент происходит угасание эмиссии СКВЛ.

По снимкам вспышки могут быть выделены следующие свойства СКВЛ:

- развитие эмиссии по направлению изнутри наружу;
- быстрое увеличение яркости и площади эмиссии с последующим «выгоранием» центральных участков (уменьшением яркости и площади), при этом максимум яркости СКВЛ достигается быстрее, чем в ВЛ;

– корреляция роста площади эмиссии СКВЛ и ВЛ на импульсной фазе вспышки и отсутствие корреляции вблизи максимума (в последнем случае, происходит рост площади ВЛ и сокращение площади СКВЛ).

– смещение некоторых участков ВЛ в область, где ранее, на импульсной фазе вспышки, были локализованы кольцевые структуры СКВЛ (см. рис. 4).

### **Вспышки в мае 1981 г.**

В мае 1981 г. на Солнце наблюдался комплекс активности, где произошли две мощные гомологичные протонные вспышки 13.05.1981 и 16.05.1981 и крупная вспышка вне солнечных пятен 14.05.1981, изучению которых посвящено большое количество работ. Подробное описание морфологии вспышечных явлений дано, в частности, в цикле работ [1; 2; 13; 163].

Во вспышке 13.05.1981 отмечен еще один класс вспышечных возмущений – удаленные уярчения [2; 23]. Для подобных структур был предложен англоязычный термин «remote brightenings» (RB, [20]). По-видимому, эти образования, предположительно связанные с удаленным основанием формирующегося ВКВ, возникают в большинстве крупных вспышек, но при малом поле зрения телескопа во время наблюдений вспышечной АО, они, как правило, не наблюдаются по техническим причинам (выше описанные случаи). В то же время, при наблюдениях с телескопами, позволяющими обозревать полный диск Солнца с высоким разрешением, RB отмечаются регулярно, причем, даже во время не очень мощных вспышек [4].

В частности, 13.05.1981 RB в виде яркой цепочки узлов усиленной хромосферной сетки к западу от вспышечного КА во время вспышки заметно увеличили яркость до уровня типичной яркости флоккулов АО и выше. Расстояние от ВЛ вспышки до RB составило 150 тыс. км (рис. 6). В этой области существовало старое магнитное поле ранее существовавшей АО. На отдельных снимках, полученных в БАО ИСЗФ СО РАН в линии Н-альфа, угадываются высокие полупрозрачные петли, протягивающиеся от области вспышки к указанным уярчениям.

Во время вспышки 16.05.1981 наблюдался полный набор описанных выше классов вспышечных элементов – СКВЛ (левая панель рис. 7), ПС и RB. В [1; 2] приведено детальное описание структур, вызвавших четверть века назад определенное недоумение – двойная эмиссионная дорожка, быстро вытягивавшаяся по направлению к головному пятну АО, располагавшаяся в пределах области одного знака магнитного поля (ПС на рис. 7). Это обстоятельство не позволяло объяснить феномен аналогично ВЛ (как цепочки оснований магнитных арок по обе стороны линии раздела полярностей). Авторы настоящей статьи интерпретируют ПС, подобно случаю 19 октября 2001 года, как цепочки систем оснований вложенных корональных арок ВКВ.

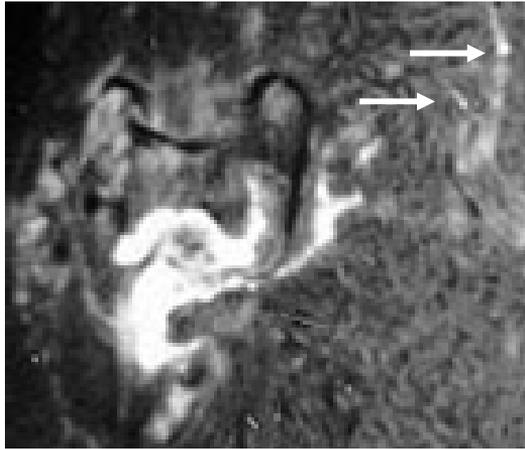


Рис. 6. Фильтрограмма в линии Н-альфа вспышки 13.05.1981. Фото С. А. Язева, БАО ИСЗФ СО РАН. Удаленные вспышечные уярчения (RB) показаны стрелками

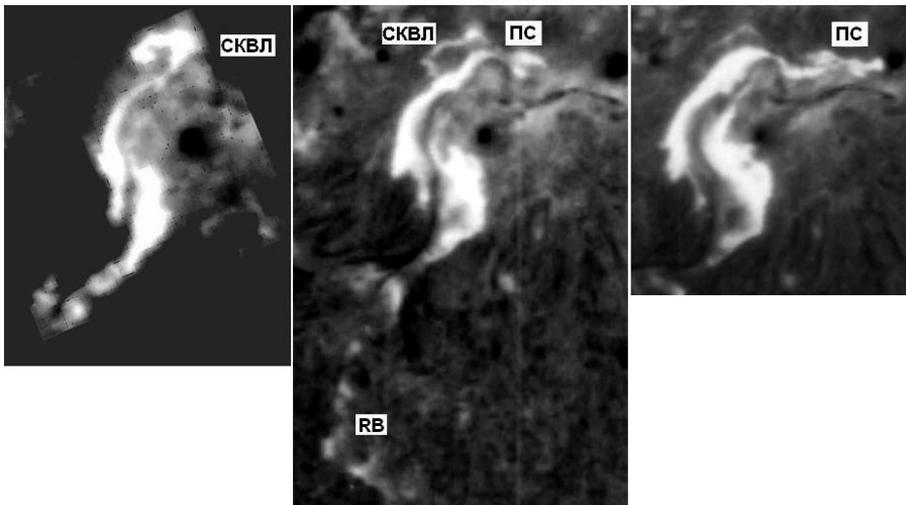


Рис. 7. Фильтрограммы в линии Н-альфа вспышки 16.05.1981, балл X1/3В. Фото С. А. Язева, БАО ИСЗФ СО РАН. Показаны: СКВЛ спиральной формы во время импульсной фазы; цепочка удаленных уярчений вспышки (обозначено RB), двойная полоска эмиссии периферийных структур (ПС)

Удаленные уярчения наблюдались и в этой вспышке.

На расстоянии 200–300 Мм к югу (по другую сторону экватора) от основной АО КА – HR 17644, в которой развивалась вспышка, располагалась группа эмиссионных узлов усиленной хромосферной сетки, которая заметно изменяла яркость во время вспышки. Эта группа узлов, наблюдавшаяся с низким разрешением на ташкентском хромосферном телескопе, названа в работе [11] эмиссионным центром-спутником. Здесь же на протяжении нескольких часов до вспышки наблюдались динамические изменения в тонкой структуре хромосферы.

На снимках, полученных в БАО ИСЗФ СО РАН с хорошим разрешением, видно, что основная часть узлов представляла собой две квазипараллельные цепочки длиной 35–50 тыс. км, вытянутые с юго-востока на северо-запад. Расстояние между цепочками – порядка характерного размера супергранулы (30 тыс. км). Судя по магнитограмме обсерватории Китт-Пик, цепочки имели разную магнитную полярность. Отчетливо наблюдались темные фибриллы, соединявшие цепочки узлов между собой. Таким образом, основная часть узлов образовывала биполярную магнитную структуру. Остальные индивидуальные узлы находились рядом с этой структурой.

Относительная яркость  $R_V$  была измерена при помощи программного пакета Adobe Photoshop 5.5 по 20 изображениям в период с 08.26 до 09.07 UT с интервалами 1–3 мин между соседними снимками. Отбор снимков для измерений осуществлялся, исходя из однородности качества изображения. Для каждого значения яркости узла определялся контраст по отношению к яркости невозмущенной хромосферы

$$K_{ij} = (I_{ij \text{ узла}} - I_{j \text{ фона}}) / I_{j \text{ фона}},$$

где  $I$  – яркость,  $i$  – номер узла,  $j$  – момент времени,  $K_{ij}$  – контраст узла  $i$  в момент  $j$ . В период наблюдений перед вспышкой (01.31–07.52 UT) яркость узлов практически не менялась.

После вынужденного перерыва на перезарядку фотокамеры (08.06–08.26 UT) яркость узлов оказалась существенно повышенной. На последующих снимках наблюдались изменения вида (формы) узлов. Отдельные узлы заметно уменьшили яркость, ряд других узлов объединился в сплошную замкнутую яркую цепочку, обрисовывая границы супергрануляционной ячейки. Контраст узлов заметно менялся, вырастая (для одного из узлов) до максимального значения 1.73 при типичных значениях 1.4–1.5. В то же время контраст двух реперных узлов, находящихся в удаленных областях диска, практически не менялся и не превышал величины 1.28. В этих же пределах находился контраст исследуемых узлов до вспышки. Максимальное значение контраста для большинства активных узлов достигалось около 08.27, после чего происходил спад яркости. Согласно [11], фаза максимальной яркости здесь наблюдалась в период 08.18–08.27 UT. Таким образом, максимум яркости УУ предшествовал максимуму яркости вспышки (8.45 UT), определенному по обобщенным данным многих обсерваторий. При наблюдениях в крыльях линии (H-альфа  $\pm 0,05$  нм) на месте ярких узлов видны темные абсорбционные детали (рис. 8.)

Есть неоспоримые свидетельства существования трансэкваториальных связей, соединяющих компоненты КА в разных полушариях. В работе [22] приведен каталог целого ряда подобных случаев. Случай вспышки 16.05.1981 можно рассматривать как впечатляющий пример всех «новых» хромосферных элементов крупных солнечных вспышек.

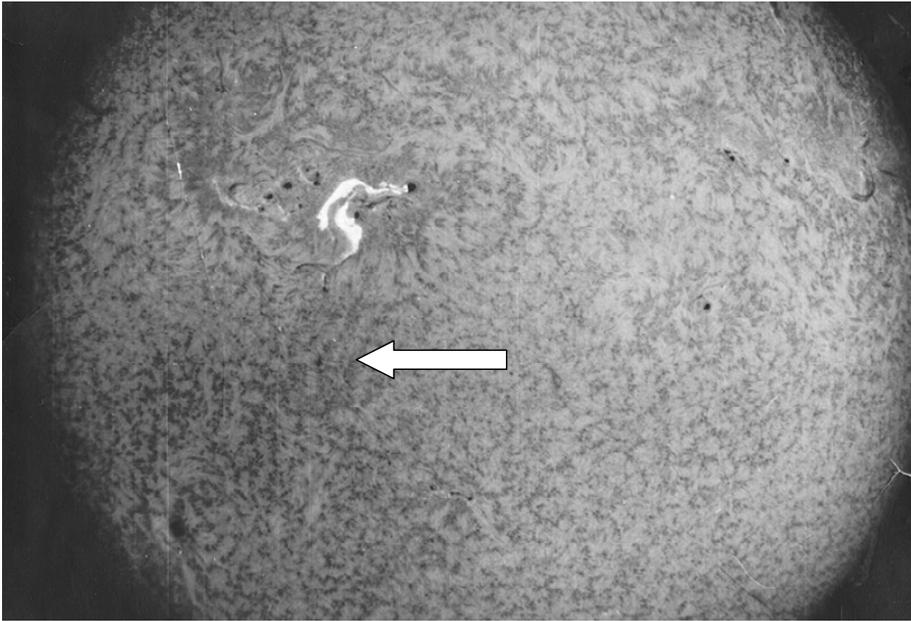


Рис. 8. Вспышка 16.05.1981, Н-альфа +0,05 нм. Фото С. А. Язева, БАО ИСЗФ СО РАН. Стрелкой указаны темные активные структуры, в центре линии здесь видны яркие RB

### Вспышка 14 июля 2000 г. («День Бастилии»)

В сложном и мощном событии 14.07.2000, имеющем балл X5.7/3B, названном Бастильской вспышкой [9; 17], удалось выделить как эмиссионные хромосферные периферийные структуры, так и удаленные вспышечные уярчения. Фильтрограммы в линии Н-альфа приведены на рис. 9. На верхней панели слева направо приведены фильтрограммы за 3–4 мин до максимума в мягком рентгене. Стрелками показана быстрая, за 1,5–2 мин, волюция ПС. На нижней панели – развитие вспышки после максимума. Удаленные уярчения обозначены стрелками.

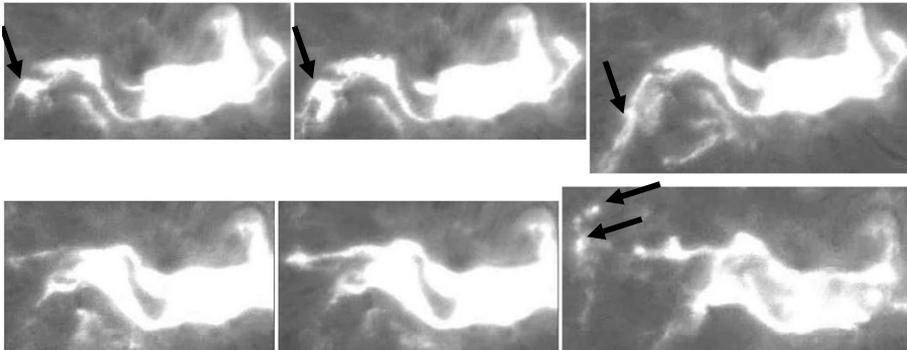


Рис. 9. Вспышка 14 июля 2000 г. (данные Hualrou, China). Восток слева, север вверху

### Вспышка 23 июля 2002 г.

Данная вспышка оказалась уникальной в том смысле, что в ней, кроме прочих многоволновых наблюдений, впервые был локализован центроид гамма-эмиссии в линии 2.223 МэВ [18]. Хромосферная эмиссия данной вспышки (наблюдения в линии Н-альфа обсерватории BBSO) в линии Н-альфа приведена на рис. 10.

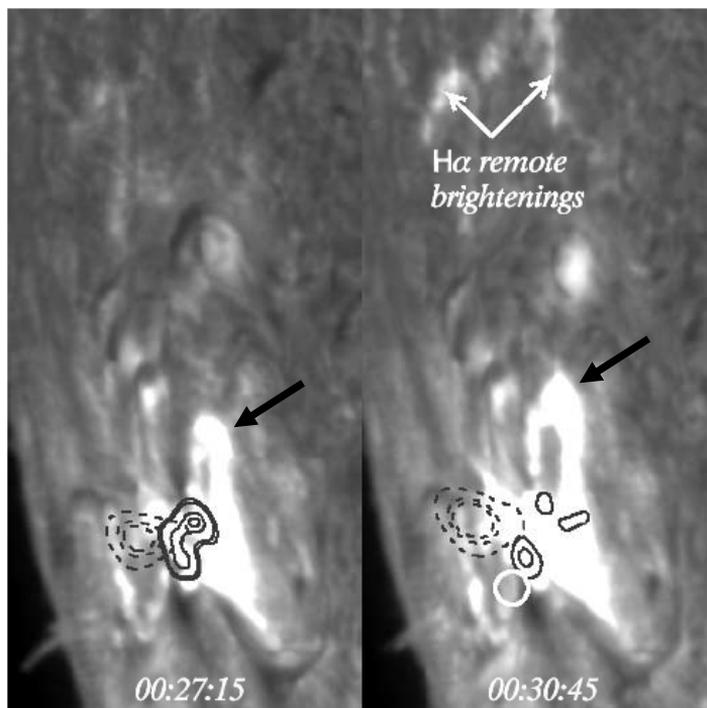


Рис. 10. Вспышка 23.07.2002. Рисунок из статьи [20] с пояснениями авторов данной статьи. Восток слева, север вверху. На левой панели представлена импульсная фаза вспышки. На правой панели – момент сразу после максимума в жестком рентгеновском излучении

Развитие СКВЛ в данной вспышке происходит в области фотосферного магнитного поля одного знака. Узел хромосферной эмиссии, входящий в пятно, и примыкающий к гамма-центроиду на рис. 10, расположен в области магнитного поля, противоположной полярности по отношению к знаку магнитного поля в области СКВЛ (судя по магнитограммам космического аппарата SOHO).

На левой панели рис. 9 наиболее яркая вспышечная петля в жестком рентгеновском излучении показана сплошным контуром. Над ней расположен корональный источник в мягком рентгеновском излучении (контур штриховой линией), соответствующий, предположительно, области первичного энерговыделения в токовом слое. С севера к хромосферному основанию вспышечной петли примыкает хромосферная СКВЛ кольцеобразной формы (обозначена черной стрелкой).

На правой панели, иллюстрирующей ситуацию вскоре после максимума вспышки в жестком рентгене, видно, что к северу от АО появились RB в линии H-альфа. Основания вспышечной петли в жестком рентгене несколько разошлись (северное основание сдвинулось к северу). Эмиссия кольцевой СКВЛ заметно расширилась по направлению изнутри наружу (показано черной стрелкой). Источник мягкого рентгеновского излучения в короне над вершиной предполагаемой вспышечной петли сместился к востоку (поднялся вверх). Южнее перечисленных видов эмиссии вблизи темного пятна обозначен белым кружком центроид гамма-источника в линии 2,223 МэВ, не совпадающий с источниками в рентгеновском излучении.

Юрчишин в [20] приводит доводы в пользу магнитного сопряжения центроида гамма-всплеска и удаленных уярчений вспышки через корональное магнитное поле, выбрасываемое во время вспышки в корону. Кроме того, источник жесткого рентгеновского излучения, который, согласно общепринятой интерпретации, должен располагаться в основаниях вспышечных петель, на протяжении всего события пространственно не совпал с ярким узлом хромосферной эмиссии, локализованным в пятне. Авторами данной статьи сделан вывод о возможности следующей локализации хромосферных оснований быстрого ВКВ, наблюдавшегося в этом событии: с одной стороны – пространственно разнесенные СКВЛ и удаленные уярчения RB, с другой стороны – компактный эмиссионный узел в пятне АО. Таким образом, асимметричность топологии корональных арок ВКВ в данном событии выражена в максимальной степени.

Рассмотрим самые внешние корональные арки ВКВ исследуемого события при его развитии в короне. Основания арок, как указано выше, замыкаются на СКВЛ и RB. Зайцев и Степанов [6] обосновали возможность быстрого (за время  $\sim 5$  мин) падения электрического тока,  $I \sim 10^{12}$  А, который течет в корональных арках от удаленных вспышечных уярчений к центроиду гамма-источника, замыкая контур под фотосферой. Авторами данной статьи предложена гипотеза об ускорении ионов в объеме корональных арок ВКВ вихревым электрическим полем. Генерация поля происходит в результате быстрого падения электрического тока. Подразумевается, что рассуждения, приведенные ниже, касаются только непотенциальной части магнитного поля, создаваемого контуром.

Рассмотрим корональную арку, расположенную над поверхностью Солнца в виде тонкого полукольца. Чтобы оценить величину компоненты электрического поля  $E_\varphi$ , направленную вдоль арки, представим контур с током  $I_\varphi$ , текущим вдоль оси арки, в виде кольца. Введем полярную систему координат  $r, \varphi, z$ , в которой ось  $z$  направим вдоль оси кольца (и вдоль вектора магнитного поля  $Bz$ ), ось  $r$  – вдоль большого радиуса арки, ось  $\varphi$  – по азимуту (вдоль оси арки).

Тогда средняя величина магнитного поля, создаваемого этим контуром, может быть грубо оценена по формуле

$$B_z \approx 0,2 \pi I \varphi / a,$$

где  $a$  – радиус кольца (высота арки над поверхностью Солнца). Используемая формула для величины поля  $B_z$  – это поле в центре кольца с линейным током  $I\varphi$  [8].

Изменение тока в контуре приводит к изменению потока магнитного поля, охватываемым этим контуром. Предполагается, что ток в арке, а следовательно, и магнитное поле, начинают спадать по линейному закону:

$$B_z(t) = B_0 (1 - t / T),$$

где  $T$  – характерное время изменения тока. При падении магнитного поля со временем, вследствие изменения потока магнитного поля  $\Phi$  через кольцо, возникнет электрическое поле  $E\varphi$ . Величину электрического поля можно найти из интегральной формы уравнения Максвелла

$$\int E dl = - (1 / c) \partial \Phi / \partial t.$$

Здесь интеграл берется по замкнутому контуру, который представляет собой окружность радиуса  $r$  с центром в точке  $r = 0$ ,  $\Phi = \int B dS$  – поток магнитного поля, охватываемый рассматриваемым контуром площадью  $S = \pi r^2$ ,  $c$  – скорость света. Рассматривая контур радиуса  $a$ , получим формулу для электрического поля в виде

$$E\varphi = a B_0 / (2cT).$$

Подставляя сюда значение  $B_0 \approx 0,2 \pi I \varphi / a$ , получим оценку

$$E\varphi = 0,2 \pi I \varphi / (2cT) \approx 0,3 I \varphi / (cT) \approx (0,3 / c) dI\varphi / dt.$$

Как видно, в таком представлении формула для величины электрического поля не зависит от геометрических размеров арки и определяется только производной тока по времени  $dI\varphi/dt$ .

Полагая  $T \approx 300$  с,  $I\varphi \approx 5 \cdot 10^{11}$  А, получим грубую оценку величины  $E\varphi \approx 5$  В/см. Очевидно, получено завышенное значение из-за того, что использована грубая модель. Более реалистичная оценка значения  $E\varphi = 1,0 - 0,1$  В/см. Электрическое поле с указанным диапазоне напряженностей, ускоряет ионы в корональных арках развивающегося ВКВ.

Этот механизм ускорения ионов позволяет объяснить в событии 23.07.2002 наличие наблюдаемого гамма-источника в линии 2,223 МэВ только в одном компактном основании ВКВ и отсутствие гамма-эмиссии во втором, протяженном основании ВКВ – удаленных хромосферных уярчениях (RB). Кроме того, механизм, в соответствии с предлагаемой топологической схемой события, объясняет наблюдаемое пространственное несовпадение центроида гамма-источника в линии 2,223 МэВ и источника жесткого рентгеновского излучения (рис. 10).

## Выводы

Анализ наблюдательных данных показывает, что для всех рассмотренных вспышек оказывается характерным присутствие типичных вспыхивающих элементов, не учитывавшихся ранее в моделях вспышек. Это структуры на концах вспыхивающих лент (СКВЛ), периферийные структуры (ПС), удаленные уярчения (РВ). В рамках развиваемой авторами топологической модели вспышки, указанные образования представляют собой хромосферные проявления оснований выброса коронального вещества (ВКВ), развивающегося во время вспышки. Эти основания оказываются единственными наблюдательными проявлениями ВКВ в оптическом диапазоне, тогда как высокие петли ВКВ на этом этапе неразличимы на фоне солнечного диска.

Одним из важных свойств ВКВ является отмеченная во всех проанализированных случаях их существенная асимметрия. Последняя проявляется в том, что одно из оснований ВКВ всегда находится в области сильных магнитных полей вблизи пятен АО, тогда как второе – всегда на периферии, или даже за пределами АО, в районе относительно слабых полей флоккула или усиленной хромосферной сетки. Указанная асимметрия приводит к асимметрии самого ВКВ, по крайней мере, на ранней стадии его развития.

Наблюдения во время вспышки эмиссионных образований типа СКВЛ, ПС и РВ обеспечивают возможность (при многоволновых наблюдениях) диагностировать динамические процессы и топологию самих ВКВ до и после фазы их импульсного ускорения до появления в поле зрения внеатмосферных коронографов в верхней короне. Такая диагностика в рамках развиваемой модели может осуществляться с учетом типичной феноменологии и характерной динамики развития эмиссионных структур вспышки. Уменьшение яркости СКВЛ, а также быстрое развитие периферийных структур, по мнению авторов, косвенно свидетельствует о прошедшем импульсном ускорении ВКВ.

Привлечение наблюдений вспыхивающих гамма-источников на Солнце не только уточняет топологическую картину ВКВ (на примере вспышки 23.07.2002), но позволяет предполагать существование механизма генерации энергичных ионов вихревым электрическим полем в объеме ВКВ.

Разработка топологической модели и условий ускорения энергичных частиц в рассмотренных геоэффективных солнечных вспыхивающих событиях могут быть полезны для прогноза прихода к Земле солнечных космических лучей.

*Авторы благодарны Л. И. Мирошниченко и В. А. Коваленко за полезные обсуждения и поддержку.*

*Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки в рамках проекта РНП.2.2.3.1/198, гранта РФФИ 09-02-90204 Монг\_а, Программы Президиума РАН № 4 и Госконтракта 02.740.11.0576.*

## Список литературы

1. *Банин В. Г.* Большие солнечные вспышки 13 и 16 мая 1981 г. / В. Г. Банин, А. В. Боровик, С. А. Язев // Исследования по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца. – М. : Наука, 1983. – Вып. 65. – С. 151–164.
2. *Банин В. Г.* Комплекс активности и большие вспышки в мае 1981 года // Исследования по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца. – М. : Наука, 1983. – вып. 65. – С. 129–150.
3. *Банин В. Г.* Сильная хромосферная вспышка 5 ноября 1970 г. / В. Г. Банин, А. С. Федорова // Исследования по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца. – Иркутск : СибИЗМИР АН СССР, 1971. – Вып. 20. – С. 73–85.
4. *Боровик А. В.* Внепятенная вспышка 16 марта 1981 г. I. Предвспышечные активизации тонкой структуры хромосферы / А. В. Боровик, Д. Ю. Мячин // Исследования по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца. – М. : Наука, 2001. – Вып. 113. – С. 89–95.
5. Вспышка 23 сентября 1998 г.: новые аргументы в пользу модели CSHKP / В. М. Мишин, В. И. Сидоров, В. М. Григорьев, С. С. Адельханов, С. А. Язев // Исследования по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца. – 2001. – Вып. 113. – С. 120–126.
6. *Зайцев В. В.* Корональные магнитные арки / В. В. Зайцев, А. В. Степанов // Успехи физических наук. – 2008. – Т. 178, № 11. – С. 1165–1204.
7. *Комарова Е. С.* Особенности развития солнечной вспышки 19 октября 2001 г. / Е. С. Комарова, В. И. Сидоров, С. А. Язев // Солнечно-земная физика. – 2004. – Вып. 6 (119). – С. 90–92.
8. *Ландау Л. Д.* Электродинамика сплошных сред / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц // Курс теоретической физики. — М. : Наука, 1982. – Т. 8.
9. *Орешина И. В.* Интерпретация быстрых изменений магнитного поля, связанных с солнечными вспышками / И. В. Орешина, Б. В. Сомов // Солнечно-земная физика. – 2008. – Т. 1, вып. 12 (125). – С. 5.
10. *Сидоров В. И.* Топологическая модель солнечного события, включавшего вспышку и корональный выброс массы 19 октября 2001 года / В. И. Сидоров, С. А. Язев // Косм. исследования. – 2008. – Т. 46, № 4. – С. 1–7.
11. *Слоним Ю. М.* Гомологические солнечные вспышки 13 и 16 мая 1981 г. / Ю. М. Слоним, К. Ф. Кулешова // Астроном. журн. – 1983. – Т. 60, вып. 6. – С. 1187–1191.
12. Солнечные вспышки / А. Т. Алтынцев, В. Г. Банин, Г. В. Куклин, В. М. Томозов. – М. : Наука, 1982.
13. *Язев С. А.* Петельные структуры, связанные со вспышками 13 и 16 мая 1981 года // Исследования по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца. – М. : Наука, 1983. – Вып. 65. – С. 165–171.
14. *Antalova A.* Catalogue of the LDE flares (January 1969 – March 1986) // Contr. Astron. Obs. Skalnatom Pleso. – 1987. – Vol. 16. – P. 79–90.
15. *Antalova A.* Long decay soft X-ray flares. II. Three-parallel ribbon LDE Flare, 1981 October, 06.15 UT / A. Antalova, M. B. Ogir // Bull. Astron. Inst. Czechosl. – 1986. – Vol. 37. – P. 344–358.
16. *Banin V. G.* Complex of Activity and Large Solar Flares / V. G. Banin, A. V. Borovik, S. A. Yazev // Contributions of the Astronomical Observatory of Skalnatom Pleso. – 1986. – Vol. 15. – P. 289–296.
17. Evolution of Magnetic Flux Rope in the Active Region NOAA 9077 on 14 July 2000 / Y. Yan [et al.] // Solar Physics. – 2001. – Vol. 204. – P. 27–40.
18. First gamma-ray images of a solar flare / G. J. Hurford [et al.] // Astrophys. J. – 2003. – Vol. 595. – P. 77–80.

19. *Heyvaerts I.* An emerging flux model for the solar flare phenomenon / I. Heyvaerts, E. R. Priest, D. M. Rust // Preprint ASE-4025. – Cambridge (Mass.), 1976.
20. Magnetic field, H $\alpha$ , and RHESSI observation of the 2002 July 23 gamma-ray flare / V. Yurchishyn [et al.] // *Astrophysical Journal*. – 2004. – Vol. 605. – P. 546–553.
21. *McKinnon J. A.* August 1972 Solar Activity and related geophysical effects // NOAA Technical Memorandum ERL SEL-22. – Space Environment Laboratory. – Boulder, Colorado. – December 1972.
22. *Pevtsov A. A.* Transequatorial loops in Solar corona // *Ap. J.* – 2000. – March 1, Vol. 531. – P. 553–560.
23. *Sidorov V. I.* Large Solar Flares and Coronal Mass Ejections: Their Manifestations in Chromosphere / V. I. Sidorov, S. A. Yazev // *Geomagnetism and aeronomy*. – 2009. – Vol. 49, N 8. – P. 1076–1079.

## On topology of coronal mass ejections during strong flare events on the Sun

V. I. Sidorov, G. N. Kichigin, S. A. Yazev

**Abstract.** Data from multiwave observations of the Sun and images obtained in chromospheric lines enable us to diagnose the dynamic pattern at the initial phase of a coronal mass ejection (CME) development in a strong flare events. Such events usually have high geoefficiency. Using nine events as an example, we have demonstrated that CME topology is characterized by considerable asymmetry of chromospheric bases and different manifestations before and after the impulsive acceleration phase. Typical differences between the emission in chromospheric bases of CME and that in flare ribbons have been shown. With the 2002 July 23 event as an example, we have proposed a mechanism of generation of energetic ions in CME magnetic arcs that can explain the initiation of gamma source and chromospheric emission in distant CME bases.

**Key words:** solar flare, coronal mass ejection, topology, fine chromospheric structure.

*Сидоров Владимир Ильич*  
Иркутский государственный университет  
664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1  
научный сотрудник астрономической обсерватории  
Институт солнечно-земной физики СО  
РАН  
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126а  
инженер отдела 1.0  
тел.: (3952) 27-12-94

*Кичигин Геннадий Николаевич*  
доктор физико-математических наук  
Институт солнечно-земной физики СО  
РАН  
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126а  
ведущий научный сотрудник отдела 1.0  
тел.: (3952)42-44-91

*Язев Сергей Артурович*  
кандидат физико-математических наук  
Иркутский государственный университет  
664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1  
директор астрономической обсерватории  
доцент  
Институт солнечно-земной физики СО  
РАН  
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126а  
старший научный сотрудник  
тел.: (3952) 27-12-94