

Учреждение Российской академии наук Институт солнечно-земной физики
Сибирского отделения РАН

УДК 523.985

На правах рукописи

СИДОРОВ

Владимир Ильич

**ДИНАМИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ
В БОЛЬШИХ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШКАХ
И ИХ СВЯЗЬ С ЭРУПТИВНЫМИ ПРОЦЕССАМИ**

01.03.03 – физика Солнца

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Иркутск – 2011

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Институте
солнечно-земной физики Сибирского отделения РАН

Научные руководители: доктор физико-математических наук
Мирошниченко Леонтий Иванович
кандидат физико-математических наук
Ишков Виталий Никитич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Максимов Владимир Павлович
кандидат физико-математических наук
Кальтман Татьяна Ильинична

Ведущая организация: Государственный астрономический
институт имени П.К.Штернберга
Московского государственного
университета имени М.В.Ломоносова

Защита диссертации состоится 2011 г. в _____ часов на заседании
диссертационного совета Д.003.034.01 при Учреждении Российской
академии наук Институте солнечно-земной физики Сибирского отделения
РАН по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126а, а/я 291, ИСЗФ СО
РАН.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Учреждения Российской
академии наук Институте солнечно-земной физики Сибирского Отделения
РАН.

Автореферат разослан «_____» _____ 2011 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д.003.034.01,
кандидат физико-математических наук

В.И.Поляков

Актуальность темы

К динамическим явлениям в больших солнечных вспышках относятся быстропеременные процессы в эмиссии и поглощении, наблюдающиеся в разных диапазонах длин волн, как в плотных слоях атмосферы Солнца, фотосфере и хромосфере, так и в вышерасположенных переходной области и короне Солнца. Большие вспышки практически всегда сопровождаются корональными выбросами вещества (Coronal mass ejection, CME), которые наблюдаются коронографами на расстояниях от нескольких солнечных радиусов над его видимой поверхностью.

Такие динамические явления отражают быструю, за время ~ 10 минут, перестройку топологии корональных магнитных структур во вспышечной активной области (АО), которая, тем не менее, почти всегда возвращается к предыдущей конфигурации магнитного поля (МП). Взрывное энерговыделение в процессе вспышки, обеспечивающее нагрев объема вспышечной аркады в нижней короне, а также ускорение CME, достигает $\sim 10^{32}$ эрг и продолжается от десятков минут до нескольких часов. Вспышки, сопровождающиеся CME, считаются одной из главных причин мощных спорадических возмущений состояния околоземного космического пространства (космической погоды): электромагнитных возмущений, солнечных протонных событий, геомагнитных и ионосферных бурь и оказывают сильное влияние на биосферу и техносферу Земли.

История построения трехмерной картины динамических явлений больших солнечных вспышек событий достаточно стара. Упомянем только несколько работ, в которых совмещены как жгутовая составляющая вспышки [1-3], так и токовые слои, формирующиеся над вспышечной аркадой при выбросе магнитного жгута [4-6]. Многоволновые наблюдения вспышек, проводимые в последние два десятилетия на внеатмосферных обсерваториях, в сочетании с данными наземных обсерваторий, дают ценный материал для понимания процесса формирования структурных компонентов CME и

изменения их кинематических характеристик на высотах от нижней до верхней короны, что уже сделано в некоторых исследованиях [7]. Тем не менее, незаслуженно забытые, как мы считаем, хромосферные высококачественные данные, прежде всего, в линии H_{α} , могут существенно уточнить взаимосвязь динамических явлений в больших вспышках и эруптивных процессов, развивающихся в это же время и приводящих к образованию СМЕ.

В этой связи, актуально комплексное изучение динамических явлений больших вспышек с помощью существующих методов мониторинга; построение уточненной топологической модели, учитывающей асимметричность структуры МП в активной области; определение изменений ключевых параметров энергетики СМЕ и вспышечной корональной аркады на всех стадиях развития, а также уровня потенциальной геоэффективности события в целом. На решение указанной важной проблемы направлена настоящая диссертационная работа.

Цель работы – создание трехмерной топологической модели больших эруптивных вспышек, соответствующей данным многоволновых наблюдений, в том числе в хромосферных линиях. Такая модель обладает значительной асимметрией. В ней акцентируется связь сильных магнитных полей АО с удаленными на 100-200 тыс. км участками флоккульных магнитных полей. Модель учитывает два топологических типа магнитных структур: эволюционирующие вспышечные петли разных масштабов, и эруптивные магнитные структуры.

Поставленная цель потребовала решения следующих задач:

1. Определение в больших вспышках, на разных стадиях развития, характерного вида хромосферных оснований СМЕ, их отличий от вспышечных H_{α} -лент.

2. Оценка временных изменений энергетических соотношений, связанных с магнитными структурами СМЕ и вспышечной корональной аркадой в процессе развития большой вспышки.
3. Определение существенных отличий между параметрами развития хромосферных оснований СМЕ и параметрами развития хромосферных оснований возвратного протуберанца в большой вспышке.
4. Обоснование новой модели источника ускоренных ионов в больших вспышках по анализу многоволновых данных, в том числе о развитии H_{α} - и гамма-источников вблизи хромосферных оснований коронального выброса.

Научная новизна

Обоснована новая классификация элементов мощной хромосферной вспышки, в которую, кроме вспышечных лент, вошли хромосферные основания СМЕ.

В большой вспышке 19 октября 2001 г. впервые найдена зависимость кинетической энергии СМЕ от времени в интервале его импульсного ускорения в короне.

На примере вспышки 23 июля 2002 г. предложена новая модель источника частиц высоких энергий, топологически связанная с эруптивными магнитными арками СМЕ в большом солнечном вспышечном событии.

Научная и практическая ценность работы

1. Полученные результаты могут быть использованы для построения на стадии роста быстро эволюционирующей трехмерной топологической картины динамических явлений больших вспышек, сопровождающихся СМЕ, а также для определения случаев возвратной эрупции протуберанца в больших вспышках.

2. Результаты могут быть использованы для расчета зависимости от времени кинетической энергии СМЕ, сопровождающего вспышку, до его выхода в поле зрения коронографов.

3. При определении полного высвобождения энергии во вспышке, сопровождающейся возвратным эруптивным протуберанцем, необходимо учитывать тот факт, что падение плазмы протуберанца в его основания вызывает дополнительное вспышечное энерговыделение, которое является производным от кинетической энергии выброса.

4. При анализе особенностей спектров СКЛ на орбите Земли должна учитываться новая модель источника ускоренных во вспышке ионов, топологически связанная с эруптивными арками СМЕ, объясняющая ускорение и удержание солнечных космических лучей (СКЛ) в больших, пространственно протяженных корональных структурах.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Предложена топологическая модель больших солнечных вспышек. Модель наиболее полно соответствует данным многоволновых наблюдений, в том числе в линии H_{α} , 11-ти больших вспышек.

2. Проведена классификация хромосферных оснований СМЕ, сопровождающих большие вспышки, включающая:

- структуры на концах вспышечных лент спиральной или кольцевой формы;
- периферийные структуры в виде тонких двойных «бегущих» полосок с общим ярким фронтом;
- вспышечные уярчения, удаленные на 100–200 тыс. км от активной области.

3. Разработана методика расчета энергетики больших вспышек, ассоциированных:

- с быстрым СМЕ на примере события 19 октября 2001 г.;
- с эруптивным возвратным протуберанцем на примере события 23 сентября 1998 г.

4. Предложена новая модель источника ускоренных ионов на основе комплексного анализа данных о большой вспышке 23 июля 2002 г. Источник расположен вблизи вершины корональных арок СМЕ, ионы ускоряются вихревым электрическим полем до энергий ~ 30 МэВ/нуклон, удерживаются

в нижней короне над пятном и взаимодействуют с плотной плазмой волокна, попадающей в область удержания. Модель позволяет согласовать удалённые уярчения в линии H_{α} с положением источников жёсткого рентгеновского излучения (100–150 кэВ) и задержанного гамма-излучения в линии 2.223 МэВ.

Личный вклад автора

Основные результаты работы являются оригинальными и получены либо лично автором, либо при его непосредственном участии на всех этапах работы совместно с соавторами. В совместных исследованиях автору принадлежат: участие в постановке задачи, разработке методов анализа данных, интерпретации результатов.

Апробация работы. Результаты, изложенные в диссертации докладывались на: международной конференции «Солнечно-земная физика» ИСЗФ СО РАН (Иркутск, 2004); научно-практической конференции «Небо и Земля» (Иркутск, 2006); всероссийской конференции «Многоволновые исследования Солнца и современные проблемы солнечной активности» САО РАН (Н.Архыз, 2006); международной конференции «Международный геофизический год ИЮ-2007» ИЗМИРАН (Звенигород, 2007); International symposium «Solar extreme events 2007: fundamental science and applied aspects» (Athens, 2007); всероссийских конференциях «Плазменные процессы в Солнечной системе (ОФН-15)» ИКИ РАН (Москва, 2008, 2010, 2011), «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра (НЕА)» ИКИ РАН (Москва, 2008), "Солнечная и солнечно-земная физика-2010" ГАО РАН (Санкт-Петербург, 2010), на научной сессии НИЯУ МИФИ-2011 (Москва); на специальных семинарах по солнечно-земной физике в ИСЗФ СО РАН (Иркутск), ИЗМИРАН (Троицк), С.-Петербургском филиале САО (Пулково), ГАИШ (Москва).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 12 статей. Из них 5 статей – в отечественных журналах, рекомендуемых ВАК для публикации результатов диссертаций.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы. Общий объем диссертации составляет 111 страниц машинописного текста, включая 43 рисунка, 4 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дается общая характеристика работы, обсуждается актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи диссертационной работы, приводятся основные положения, выносимые на защиту, а также данные об апробации работы.

В главе 1 приведен краткий обзор современного состояния исследований основных динамических процессов в больших солнечных вспышках, основных трехмерных моделей вспышек, предложена новая классификация хромосферных элементов солнечной вспышки, а также обоснована топологическая модель больших вспышек на основе анализа данных наблюдений 11-ти вспышек.

Предлагаемая модель опирается на ряд предшествующих моделей, в которых крупномасштабный магнитный жгут растущего СМЕ развивается над областью первичного энерговыделения, которая содержит токовый слой над вершинами вспышечной аркады.

Сочетание элементов предшествующих моделей с новой интерпретацией хромосферных элементов больших вспышек, дополненные комплексным анализом данных о явлениях в хромосфере, переходной области, нижней и средней короне 11 больших вспышек, полученными с помощью наземных и космических обсерваторий (*SOHO*, *TRACE*, *GOES*, *YOHKOH*, *RHESSI*), позволили предложить уточненную топологическую модель вспышек.

В этой модели хромосферные данные используются более полно. Она дает подробную картину формирования и роста в нижней и средней короне не только вспышечной аркады, но и крупномасштабного магнитного жгута, выброс которого приводит к развитию СМЕ. Это стало возможным

вследствие отождествления некоторых элементов хромосферной эмиссии вспышки с основаниями СМЕ. Типичные варианты динамики развития оснований СМЕ, в комплексе с данными многоволновых наблюдений вспышек, позволяют более точно определять интервал и особенности импульсного ускорения СМЕ.

В главе 2 предложена классификация хромосферных оснований корональных выбросов вещества, проявляющихся в больших солнечных вспышках. Используются хромосферные данные об 11-ти больших вспышках: 5.11.1970, 2.07.1972, 4.07.1972, 7.07.1972, 13.05.1981, 16.05.1981, 12.10.1981, 23.09.1998, 14.07.2000, 19.10.2001, 23.07.2002. Эти вспышки, имели оптический балл не ниже 2В, и дали значительные потоки СКЛ на орбите Земли.

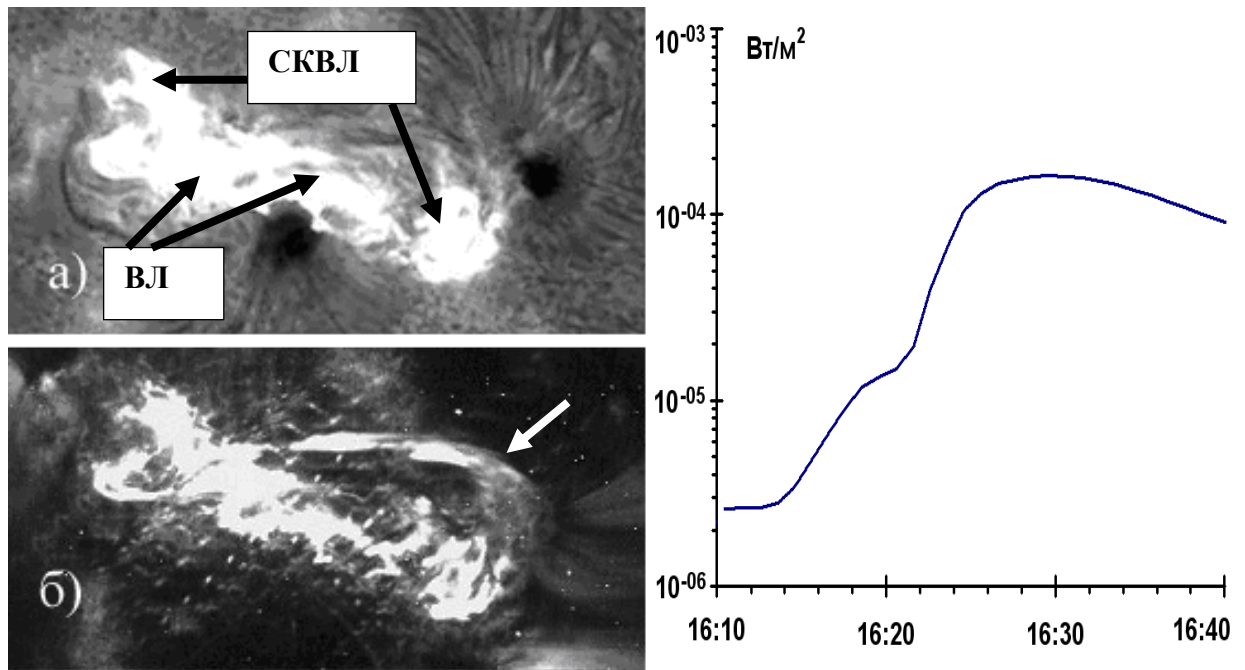


Рис.1. Снимки большой вспышки 19 октября 2001 г. балла 2В/Х1.6 в 16:24 UT: в линии H_{α} , по данным BBSO (верхняя левая панель); в линии 171\AA , по данным TRACE (нижняя левая панель). Поток мягкого рентгеновского излучения вспышки (канал $1-8\text{\AA}$, данные GOES) приведен на правой панели. Черными стрелками обозначены вспышечные H_{α} -ленты (ВЛ) и структуры на концах вспышечных лент (СКВЛ). Белой стрелкой – выброс магнитного жгута, содержащего волокно (прослеживается в эмиссии и поглощении), которое опирается на две СКВЛ.

Причем, хромосферные эмиссионные структуры на концах вспышечных лент (СКВЛ), описанные ранее [8], отождествлены с хромосферными

основаниями СМЕ. Также, показано, что распространение кольцевой эмиссии СКВЛ дает информацию об увеличении диаметра и подъеме магнитного жгута (образующегося СМЕ). Малоизученные ранее элементы хромосферной вспышки, отходящие от СКВЛ в виде тонких двойных эмиссионных «быстро бегущих» полосок с ярким общим фронтом, названные нами периферийными структурами, интерпретируются в работе как хромосферные основания магнитных петель внешней «оплетки» СМЕ, образующих «купол» над магнитным жгутом. Эти петли как бы оплетают жгут и активизируются вблизи максимума.

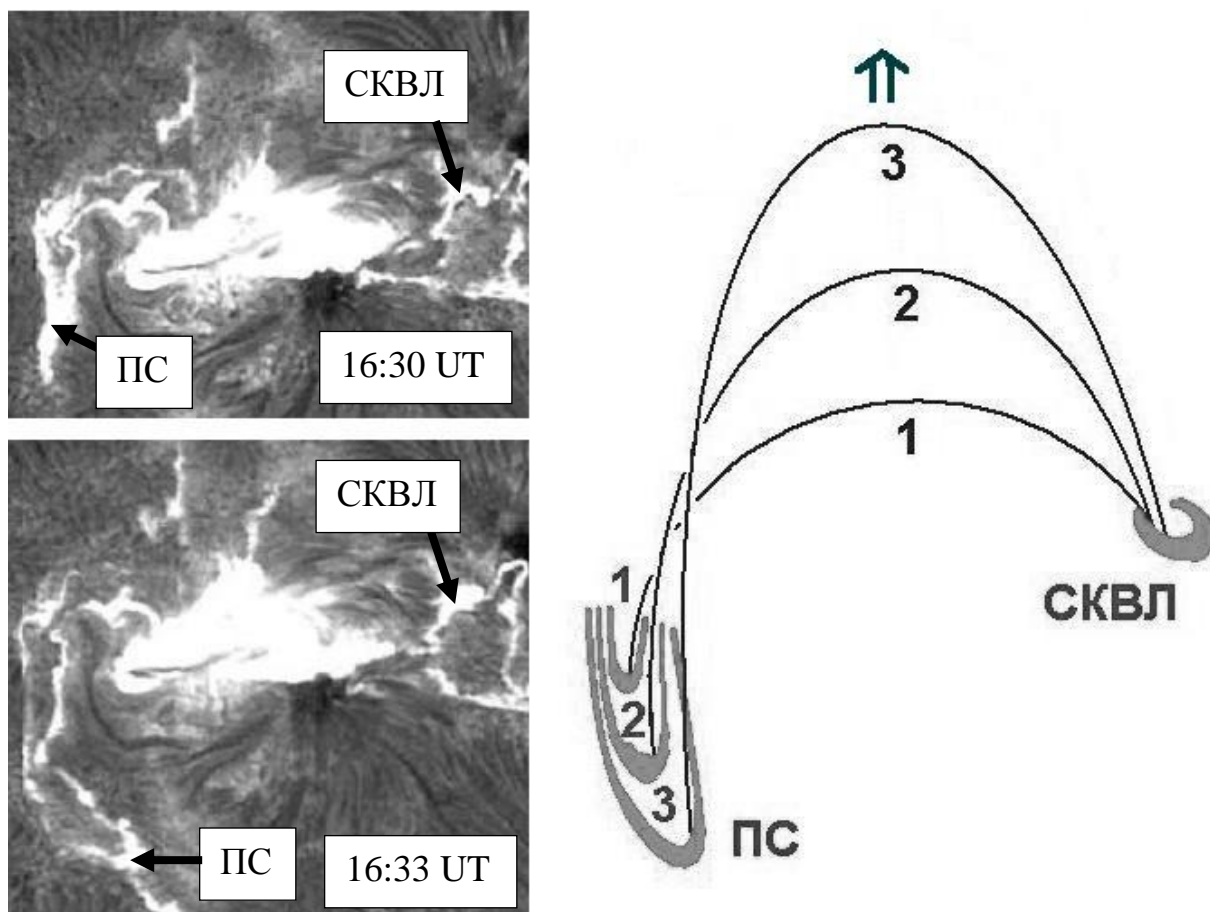


Рис.2. Развитие вспышки 19 октября 2001 г. после максимума. На левых панелях (данные в линии H_{α}) показано развитие периферийных структур (ПС) в виде двойных эмиссионных полосок с общим ярким фронтом. На правой панели – схема магнитного замыкания (без учета масштаба) эруптивных корональных арок растущего магнитного жгута в последовательные моменты времени 1, 2, 3.

Согласно предложенной в работе интерпретации, периферийные структуры являются не только основаниями петель СМЕ, но и качественным

показателем его высокой скорости. Неравномерное угасание двойных полосок периферийных структур после максимума вспышки позволяет определять наличие магнитной связи СМЕ с Солнцем в исследованных событиях, по крайней мере, до расстояний в 6 солнечных радиусов. На постмаксимальной стадии события внешняя по отношению к АО эмиссионная полоска периферийных структур связана с фронтом СМЕ, который со скоростью ≥ 800 км/с удаляется от Солнца. По длительности эмиссии этой полоски, при известной скорости фронта, высота коронального выброса, при которой сохраняется его связь с хромосферой, оценена как $2\div 6$ солнечных радиусов.

Самыми далекими и слабыми участками хромосферной эмиссии, связанными со вспышечной активной областью (АО), являются удаленные уярчения вспышки. Появление их интерпретируется как активизация самых внешних корональных петель быстрого коронального выброса. Эти участки эмиссии, оказались важным признаком наличия в событии ускоренных ионов, захваченных в больших, пространственно протяженных корональных структурах. На примере ряда больших вспышечных событий показаны варианты развития хромосферных оснований корональных выбросов, отмечены их особенности.

В первом варианте (событие 19.10.2001), сначала одновременно развиваются две СКВЛ, немного опережающие развитие двух вспышечных лент; затем от одной из СКВЛ, начинается быстрое развитие периферийных структур, которое заканчивается несколькими удаленными уярчениями хромосферной сетки. В таком событии, согласно идеологии модели, образуется, кроме вспышечных петель, быстрый корональный выброс с ярким ядром. Импульсное ускорение выброса в нижней короне предшествует развитию периферийных структур.

Во втором варианте (событие 23.09.1998), также одновременно развиваются две СКВЛ, опережающие развитие пары вспышечных лент;

затем происходит краткое угасание как СКВЛ так и вспышечных лент; и после следует мощное развитие второй пары вспышечных лент, локализованных на месте угасших СКВЛ. Причем, вторая пара вспышечных лент в рассмотренных нами случаях квазиортогональна (около $70^\circ \div 90^\circ$) первой паре вспышечных лент, почти полностью угасшей во второй стадии события. Согласно модели, эмиссия второй пары вспышечных лент вызвана ударным возбуждением хромосферы вследствие падения вещества эруптивного протуберанца (волокон) при его возвратном движении.

В третьем варианте (событие 23.07.2002), также сначала возникает эмиссия вспышечных лент и структур на концах вспышечных лент; затем, без появления периферийных структур, развиваются удаленные уярчения вспышки.

В сложных событиях, подобных Бастильской вспышке 14.07.2000, также можно выделить элементы хромосферных оснований корональных выбросов.

В главе 3 рассчитаны временные изменения энергетических соотношений между ускоряющимся СМЕ и возрастающей тепловой энергией вспышки. Мы придерживаемся подхода, в котором один источник энергии обеспечивает в процессе большой вспышки как ускорение коронального выброса, так и нагрев вспышечной АО, с учетом потерь на излучение и за счет теплопроводности.

В разделе 3.1 метод расчета вспышечного высвобождения энергии в токовом слое, предложенный ранее для стадии спада вспышки [9], адаптирован для стадии роста события. В методе используются хромосферные данные об изменениях площади вспышечных H_α -лент во время события. Общая точность расчетов не превышает порядка величины. Другой метод позволяет оценить временные вариации затрат энергии на тепловой нагрев области вспышки, на потери за счет излучения и теплопроводности [10]. Точность этого метода приемлема для дальнейших задач сопоставления и интерпретации результатов наблюдений. Значения

темпа высвобождения энергии в токовом слое, по первому методу, должны существенно превышать значения затрат энергии, рассчитанных по второму методу, поскольку во втором методе не учтена кинетическая энергия выброса.

Сопоставление значений, полученных двумя методами, логически удобно для получения новой информации об энергетике большого вспышечного события. Однако, это можно реализовать только, привлекая дополнительную информацию о кинетической энергии СМЕ, полученную независимо.

В разделе 3.2 описанная выше методика была применена к большой солнечной вспышке на диске 19 октября 2001 г., имеющей балл 2В/Х1.6, и сопровождавшейся корональным выбросом типа «гало». Значение кинетической энергии СМЕ взято из каталога *SOHO/LASCO*.

Интегральную разницу значений, полученных двумя методами, можно интерпретировать как соответствующую значению кинетической энергии СМЕ, поскольку другие агенты, способные унести в трансформированном виде часть общей энергии события, гораздо менее эффективны. Отсюда, появляется возможность уточнить график временных вариаций высвобождения энергии в токовом слое таким образом, чтобы значения кинетической энергии, полученные независимо, оказались равны.

В итоге, мы сопоставляем два графика, полученные двумя методами с близкой точностью. Разность двух полученных графиков можно интерпретировать как вариации потока энергии, затрачиваемого (в пределах точности методов) на ускорение СМЕ в нижней короне.

В исследованном событии 19 октября 2001 г. удалось обнаружить следующие особенности. Энергетический максимум затрат на ускорение СМЕ произошел на 7 минут раньше энергетического максимума затрат на нагрев области вспышки, потерь на излучение и теплопроводность. Причем, интегральные значения энергии, полученные СМЕ и вспышечной аркадой корональных магнитных петель от общего источника, оказались близкими.

Основное ускорение СМЕ в данном событии произошло, исходя из энергетических соотношений, в течение 4 – 5 минут во время импульсной фазы события. Соотношение затрачиваемой энергии на ускорение СМЕ и на нагрев вспышечной корональной аркады в импульсной фазе около 4:1, а вблизи максимума события – около 1:4, соответственно.

Ускорение протонов в этом событии, если опираться на данные о гамма-всплеске, зарегистрированном прибором СОНГ в диапазонах энергий $0.5 \div 1.3$ и $1.3 \div 4$ МэВ, происходило в нескольких эпизодах, наиболее мощный из которых совпал по времени с быстрым развитием периферийных структур после максимума вспышки, окончившимся образованием удаленных вспышечных уярчений.

В разделе 3.3 описанная выше методика была применена для исследования вспышек с возвратным эруптивным протуберанцем (18.08.1995, 23.09.1998).

В таком варианте энергетика события представляется более сложной. Само событие логично разбить на две стадии. Высвобождение энергии в токовом слое предполагается только в первой стадии, в которой разница между временными вариациями, полученными двумя методами, может быть интерпретирована как кинетическая энергия эруптивного протуберанца. Вещество последнего, при обратном падении на хромосферные основания протуберанца, должно обеспечить вспышечное проявление второй стадии события, выражающееся в нагреве области вспышки, с учетом других потерь. В этой стадии логично ожидать близкие значения кинетической энергии падающего вещества протуберанца и тепловой энергии вспышечной аркады.

В подразделе 3.3.1 сценарий солнечной вспышки с возвратным протуберанцем качественно проиллюстрирован на примере лимбового события 18.08.1995.

В подразделе 3.3.2 сделаны оценки энергетических соотношений кинетической энергии эруптивного протуберанца и тепловой энергии

вспышечной аркады для события на диске 23.09.1998, имевшего балл 3В/М6.9. Сценарий развития вспышек такого типа не свободен от трудностей. Само падение протуберанца не всегда прослеживается на диске из-за множества ярких деталей хромосферы. В данном событии удалось подтвердить соответствие кинетической энергии протуберанца и тепловой энергии вспышки во второй стадии, $\sim 3 \cdot 10^{31}$ эрг, с точностью до порядка величины. СМЕ в данном событии, который мог бы уточнить оценки, к сожалению, не был обнаружен из-за отсутствия наблюдений на коронографе *SOHO/LASCO*. Поэтому, была получена только нижняя оценка полного энерговыделения, соответствующая суммарной тепловой энергии вспышки в обеих стадиях.

Интегральные значения энергии, полученные эруптивным протуберанцем и вспышечной областью от общего источника в первой стадии, оказались в соотношении не менее 6:1.

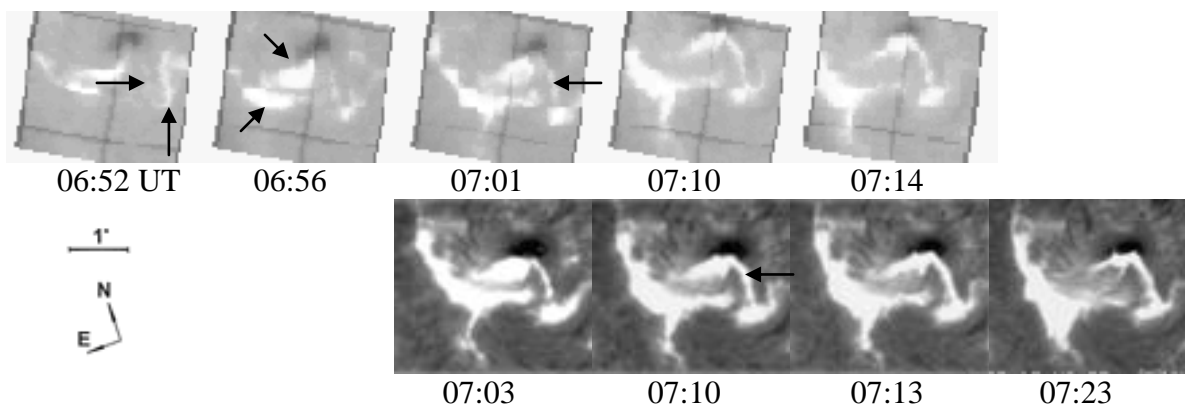


Рис. 3. Изображения вспышки 23.IX.1998 г. в линии H_{α} (Ондржейов, Чешская Республика): верхний ряд – снимки грубого качества, полученные на многоканальном спектрографе; нижний ряд – высококачественные фильтрограммы. Наклонными стрелками в 06:56 UT показаны первые вспышечные ленты (ВЛ1). Вертикальной стрелкой обозначена эмиссия западной структуры на концах вспышечных лент (СКВЛ), более сильная с внешней стороны «сплющенного овала». В 07:23 UT видна мощная вторая пара вспышечных лент (ВЛ2), квазиортогональная паре ВЛ1, которая к этому моменту практически исчезла. Можно по характерным неизменившимся особенностям эмиссии показать, что западная ВЛ2 локализована на месте внутренней эмиссии «овала» СКВЛ (обозначено горизонтальными стрелками).

Также, нами был предложен наблюдательный хромосферный критерий возвратного протуберанца в большой солнечной вспышке на диске. Он заключается в формировании в начале события, то есть в первой стадии, кроме вспышечных лент, также и СКВЛ, которые к моменту затухания первоначальных вспышечных лент получают мощное дальнейшее развитие, превращаясь во вторые, более разнесенные друг от друга вспышечные ленты, превышающие по площади первые вспышечные ленты. Этот критерий одновременно является критерием отсутствия яркого «ядра» СМЕ, образовавшегося в исследуемом событии.

В главе 4 на примере вспышки 23 июля 2002 г., имеющей балл 2В/Х4.8, исследована связь быстрого СМЕ с солнечными энергичными ионами, наличие которых в событии установлено по гамма-всплеску, (данные обсерватории *RHESSI*) локализованному вблизи сильных магнитных полей вспышечной АО. На орбите Земли возрастание потоков СКЛ от данной вспышки оказалось трудно определяемым вследствие наложения потоков предыдущего протонного солнечного события 20 июля 2002 г.

Световая кривая гамма-источника в линии 2.223 МэВ, оказалась коррелирующей со световой кривой удаленных хромосферных H_{α} -уярчений вспышки [11]. Из этого факта сделан вывод о магнитном сопряжении коррелирующих источников гамма-эмиссии в линии 2.223 МэВ и удаленных H_{α} -уярчений вспышки, предположительно, магнитными структурами, выброс которых в корону наблюдался в это время [11]. По нашим же исследованиям, удаленные (на 100–200 тыс.км от вспышечной АО) H_{α} -уярчения являются основаниями самых внешних эруптивных корональных арок в составе СМЕ.

Проведенный анализ позволил предложить новую модель источника частиц высоких энергий, основанную на механизме ускорения частиц (ионов) вихревым электрическим полем вблизи расширенной вершины магнитной арки СМЕ до энергий $\sim 10 \div 100$ МэВ/нуклон. Дрейф ускоренных ионов к компактному основанию СМЕ приводит к их удержанию в пробкотроне в

нижней короне над сильным магнитным полем пятна, и создает источник быстрых нейтронов с преобладающим распределением скоростей по касательной к фотосфере. Последнее существенным образом влияет на параметры и локализацию в фотосфере гамма-источника в линии 2.223 МэВ.

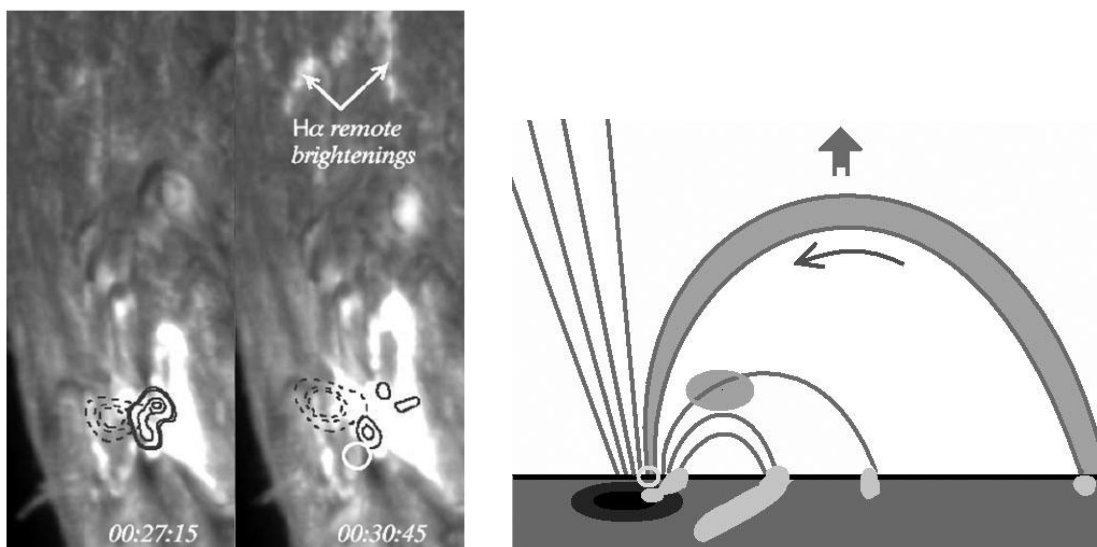


Рис.4. Изображения вспышки 23 июля 2002 г. (слева) по данным BBSO и RHESSI. H_{α} -фильтрограммы показаны в градациях серого. Восток – слева, север – вверху. Прерывистый контур соответствует источнику 12–20 кэВ, сплошной контур – источнику 100–150 кэВ, белым кружком показан центроид гамма-источника в линии 2.223 МэВ. Белыми стрелками обозначены удаленные H_{α} -уярчения вспышки. Слева – импульсная фаза события, в центре – момент сразу после максимума в жестком рентгеновском излучении.

Справа – топологическая схема события. Ниже лимба показано солнечное пятно и хромосферная эмиссия, выше лимба – открытые силовые магнитные линии, исходящие из пятна, низкие вспышечные петли, соединяющие хромосферные ленты. Серым тоном показаны эруптивные магнитные арки СМЕ; в их левом основании обозначен центроид источника излучения 2.223 МэВ (белый кружок). Направление электрического поля, ускоряющего ионы, показано горизонтальной стрелкой.

Ключевым элементом данной модели является топологическая схема большой вспышки, опирающаяся на многоволновые наблюдения с обязательным привлечением данных в линии H_{α} . Новая модель источника частиц высоких энергий топологически связана с развивающимся в нижней и

средней короне корональным выбросом. Исследованы характерные особенности магнитных структур СМЕ – значительная асимметрия оснований.

В заключении сформулированы основные результаты работы:

1. Построена трехмерная топологическая модель больших солнечных вспышек, соответствующей данным многоволновых наблюдений, в том числе в хромосферных линиях, 11 событий. Особенности модели: существенная асимметричность корональных магнитных структур, связь сильных магнитных полей активной области с удаленными на 100-200 тыс. км участками флоккульных магнитных полей; подразделение корональных магнитных структур на два типа: 1) эволюционирующие вспышечные петли и 2) эруптивные магнитные структуры СМЕ.

2. Предложена новая классификация элементов большой хромосферной вспышки, в которую, кроме вспышечных лент, вошли хромосферные основания СМЕ:

структуры на концах вспышечных лент, периферийные структуры, а также уярчения вспышки, удаленные на 100-200 тыс. км от вспышечной АО.

3. Разработана методика, позволяющая найти в больших вспышках зависимость кинетической энергии быстрого СМЕ от времени в нижней и средней короне, до его выхода в поле зрения коронографов.

4. Получены оценки соотношений кинетической энергии выброса и тепловой энергии вспышки (с учетом затрат на излучение и теплопроводность) для двух событий:

– для вспышки с СМЕ 19.10.2001 г. это соотношение оказалось близко к 1, причем, соотношение потоков затрачиваемой энергии на ускорение коронального выброса и на нагрев вспышечной аркады в импульсной фазе составил 4:1, а вблизи максимума события – 1:4, соответственно.

– для вспышки с возвратным протуберанцем 23.09.1998 отношение кинетической энергии протуберанца к тепловой энергии вспышки в первой стадии $\geq 6:1$.

5. Предложена новая модель источника ускоренных ионов на основе анализа гамма-вспышки 23.07.2002 г., имеющая следующие особенности:

- ионы ускоряются вихревым электрическим полем до энергий 10–100 МэВ/нуклон в эруптивных магнитных арках коронального выброса;
- область удержания энергичных ионов в основании магнитных арок СМЕ локализована в короне над сильным магнитным полем пятна;
- здесь же ускоренные ионы взаимодействуют с плотной плазмой волокна, попадающей в область удержания;
- распределение скоростей энергичных ионов и вторичных нейтронов – веерообразное, почти параллельное фотосфере.

Основные результаты диссертации опубликованы в статьях:

1. Комарова Е.С., Сидоров В.И., Язев С.А. Особенности развития солнечной вспышки 19 октября 2001г//Солнечно–земная физика.–2004.–Вып.6(119).–С.90–92.
2. Сидоров В.И. Соотношение энергетики вспышки и коронального выброса массы 19 октября 2001 г.//Солнечно–земная физика.–2004.–Вып.8(121).–С.71–72.
3. Сидоров В.И., Язев С.А. Корональный выброс массы и структуры на концах вспышечных лент в солнечной вспышке 19 октября 2001 г.// Избранные проблемы астрономии: материалы научно-практической Конференции «Небо и Земля» (г. Иркутск, 21–23 ноября 2006 г.) –Иркутск: ИГУ. –2006. –С. 209–215.
4. Сидоров В.И., Язев С.А. О топологии солнечного события, включавшего вспышку и корональный выброс массы 19 октября 2001 г. // Избранные проблемы астрономии: материалы научно-практической Конференции «Небо и Земля» (г. Иркутск, 21–23 ноября 2006 г.) –Иркутск: ИГУ.–2006.–С.216–224.
5. Сидоров В.И., Язев С.А. Проблема вещества в солнечных вспышках и корональных выбросах массы // Избранные проблемы астрономии:

материалы научно-практической Конференции «Небо и Земля» (г. Иркутск, 21–23 ноября 2006 г.). –Иркутск: ИГУ, –2006. –С. 225–230.

6. Сидоров В.И., Язев С.А. Топологическая модель солнечного события, включавшего вспышку и корональный выброс массы 19 октября 2001 года // Космические исследования. –2008, –Т. 46. –№4. –С. 329–335.

7. Сидоров В.И., Язев С.А. Мощные солнечные вспышки и выбросы корональной массы: хромосферные проявления //Солнечно–земная физика. – 2008. –Вып. 12 (125). –№1. –С.10–12.

8. Sidorov V.I. and Yazev S.A. Large Solar Flares and Coronal Mass Ejections: Their Manifestations in the Chromosphere // Geomagnetism and Aeronomy.–2009. –V.49.–№8. (Special Issue 2).–P.1076–1079.

9. Savinkin M.Yu., Sidorov V.I., and Yazev S.A. Unique Activity Complex between 2006 and 2007 // Geomagnetism and Aeronomy. –2009. –V.49, –№8. (Special Issue 2), –P. 1072–1075.

10. Сидоров В.И., Кичигин Г.Н., Язев С.А. О топологии выбросов коронального вещества в мощных вспышечных событиях на Солнце // Известия Иркутского госуниверситета. Серия «Науки о Земле». Т.3. №2. 2010, с. 139–155.

11. Кичигин Г.Н., Мирошниченко Л.И., Сидоров В.И., Язев С.А. Особенности крупного солнечного события 23 июля 2002 г.: модель источника ускоренных частиц // Труды всероссийской конференции «Солнечная и солнечно-земная физика-2010», СПб, Пулковое, 2010, с.201– 204.

12. Сидоров В.И., Кузьминых Ю.В., Язев С.А. Вспышка с возвратным протуберанцем: сценарий, энергетика, прогноз // Космические исследования. –2011, –Т.49. –№3. –С. 82–94.

Цитируемая литература

1. Алтынцев А.Т., Банин В.Г., Куклин Г.В., Томозов В.М. Солнечные вспышки. –1982. –С. 32-34.

2. Martens P.C.H. and Kuin N.P.M. A circuit model for filament eruptions and two-ribbon flares // Solar Physics. –1989. –V.122. –P. 263-302.
3. Hirayama T. Theoretical Model of Flares and Prominances. I Evaporating Flare Model // Solar Physics. –1974. –V. 34. –P.323-338.
4. Shibata K. A unified model of solar flare. In: Observational Plasma Astrophysics: Five Years of Yohkoh and Beyond. Edited by T.Watanabe, T.Kosugi, and A.C.Sterling. Boston, Mass.: Kluwer Academic Publishers // Astrophysics and space science library. –1998. –V. 229. –P.187-198.
5. Priest E.R., Forbes T.G. Magnetic Reconnection: MHD Theory and Applications. Cambridge University Press, Cambridge, U.K.; New York, –2000, U.S.A.
6. Somov B.V., Kosugi T., Hudson H.S., Sakao T., and Masuda S. Magnetic Reconnection Scenario of the Bastille Day 2000 Flare // Astrophysical Journal. 2002. –V. 579. –P. 863-873.
7. Uralov A.M., Grechnev V.V., Hudson H.S. Initial localization and kinematic characteristics of the structural components of a coronal mass ejection // Journal of geophysical research. –V.110. –2005. A05104, doi:10.1029/2004JA010951.
8. Банин В.Г., Федорова А.С. Сильная хромосферная вспышка 5 ноября 1970г. // Исследования по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца. Иркутск, СибИЗМИР АН СССР, –1971. –Вып. 2. –С. 73-85.
9. Isobe H., Yokoyama T., Shimojo M, M., Morimoto, T., Koizu, H., Eto, S., Narukage, N., Shibata, K. Reconnection Rate in the Decay Phase of a Long Duration Event Flare on 1997 May 12 // Astrophys.J. –2002. –V.566. –P.528- 538.
10. Ohyama M., and Shibata K. Preflare Heating and Mass Motion in a Solar Flare Associated with Hot Plasma Ejection: 1993 November 11 C9.7 Flare // Publ. Aston. Soc. Japan. –1997. –V. 49. – P. 249-261.
11. Yurchyshyn V., Wang H., Abramenko V., Spirock T., and Krucker S. Magnetic field, H_{α} , and RHESSI observation of the 2002 July 23 gamma-ray flare // Astrophysical Journal. –2004. –V. 605. –P. 546–553.