



УДК 523.98

Наблюдения внепятенных солнечных вспышек в Байкальской астрофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН и их интерпретация

А. В. Боровик (aborovik@iszf.irk.ru)

Д. Ю. Мячин (myachin@iszf.irk.ru)

В. М. Томозов (tom@iszf.irk.ru)

Аннотация. По наблюдениям хромосферы в линии H_{α} были изучены пять солнечных вспышек вне пятен, зарегистрированных в Байкальской астрофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН 16 марта 1981 г., 28 июня 2001 г. (две вспышки), 28 мая 2002 г. и 5 июня 2002 г. Использовались также данные наблюдений из других обсерваторий по фотосфере и данные о магнитном поле из обсерватории Кит Пик (США) и ИСЗ SOHO/MDI. Для вспышки 16 марта 1981 г. подробно изучена эволюция активной области и предвспышечные активизации в хромосфере. Особо отмечен факт появления перед вспышкой вблизи линии раздела полярностей вихревой структуры S-типа. Установлена тесная связь вспышечных лент и узлов с границами хромосферной и магнитной сеток, с холмами магнитного поля, имеющими высокие значения напряженности поля. Обнаружено, что большая часть этих вспышек произошла на фазе роста магнитного поля в магнитных холмах активной области. На основе современных моделей солнечных вспышек представлена интерпретация возникновения, структуры и развития внепятенных вспышек.

Ключевые слова: солнечно-земная физика, солнечная активность, вспышки.

Введение

Солнечные вспышки возникают в результате быстрого превращения энергии электрических токов в энергию мощных гидродинамических движений плазмы, потоков тепла, излучения и ускорения частиц. Они являются началом сложной цепочки процессов, воздействующих на магнитосферу, ионосферу и нейтральную атмосферу Земли, а также оказывают существенное влияние на радиационную обстановку в околоземной среде. Мощные солнечные вспышки способны также привести к нарушению работы больших энергетических систем на Земле. Вследствие этого изучение процессов, приводящих к накоплению энергии в активных областях и ее высвобождению во время вспышек, является одной из актуальнейших проблем солнечно-земной физики.

Атмосфера Солнца является крайне неоднородной, многомасштабной и очень динамичной системой, все слои которой связаны между собой магнитным полем и динамикой движений плазмы. Из-за действия механизма

динамо в конвективной зоне Солнца происходит усиление магнитных полей. Конвективные движения вещества различных масштабов (грануляция, мезо- и супергрануляция), а также магнитная плавучесть приводят к выходу усиленных магнитных полей в фотосферу Солнца. Динамическое поведение магнитных полей в солнечной короне, обусловленное конвективными движениями плазмы в фотосфере, приводит к процессам диссипации магнитной энергии в большом диапазоне пространственных и временных масштабов (в форме нановспышек, микровспышек, вспышек и выбросов корональной массы). Статистические характеристики выходящих на поверхность Солнца магнитных полей и энергетические свойства вспышек описываются распределениями, имеющими степенной характер. Это позволяет считать, что солнечная атмосфера находится в состоянии самоорганизованной критичности [19].

Наиболее яркими и геоэффективными проявлениями солнечной активности являются вспышки и корональные выбросы массы. Природа их тесно связана с динамикой магнитных полей в солнечной атмосфере. В качестве источника энергии всех эруптивных явлений в солнечной атмосфере принято считать свободную энергию, накапливаемую в корональном магнитном поле и способную быстро освобождаться при определенных условиях. Быстрая диссипация энергии магнитного поля осуществляется в процессе магнитного пересоединения, происходящего в токовых слоях, которые образуются в некоторых особых областях магнитных структур (нейтральных точках, нулевых точках, сепаратрисных поверхностях) [1; 7]. Выделение свободной энергии магнитных полей в токовых слоях сопровождается появлением быстрых потоков горячей плазмы с образованием ударных волн, электромагнитного излучения и пучков энергичных частиц. Роль этих каналов освобождения энергии может изменяться в зависимости от плотности плазмы и величины магнитного поля.

Возникновение токовых слоев как основных диссипативных элементов является универсальным свойством солнечной атмосферы и непосредственно связано со структурой течений плотной плазмы фотосферы. Одна из основных ее характеристик – наличие сдвиговых и вихревых движений между конвективными элементами различных масштабов. Сдвиговые движения, деформируя основания силовых линий магнитного поля, закрепленных в фотосферных слоях, приводят к накоплению энергии во всей вышележащей магнитной конфигурации и рождению токовых слоев [8; 14; 21]. Токовый слой подвержен неустойчивости относительно разбиения однородного слоя на отдельные токовые волокна (тиринг-неустойчивость). Быстрое выделение энергии в токовом слое становится возможным, когда плотность тока в нем превышает порог кинетической неустойчивости, порождающей аномальное сопротивление [1]. В условиях плазменных установок при лабораторном моделировании процессов энерговыделения в токовых слоях были зарегистрированы оба вида неустойчивостей.

В оптическом диапазоне (в линии H_{α}) одним из предвестников появления вспышек в активных областях является активизация волокон (протуберанцев). Волокна локализуются над линиями раздела полярностей поля

(ЛРП). Над волокнами располагаются замкнутые линии магнитного поля, создающие в целом закрытую магнитную конфигурацию всей активной области. При дестабилизации волокно начинает усиленно колебаться, затем поднимается вверх и может «прорвать» вышележащие линии поля в ходе магнитного пересоединения с образованием токового слоя. Конфигурация магнитного поля области в целом становится вытянутой, и сила Лоренца начинает препятствовать дальнейшему выходу волокна. Если же накопленная энергия волокна при определенных условиях превышает энергию сдерживающего вышележащего поля активной области, то происходит «прорыв» магнитного поля с выходом волокна в корону, размыканием магнитной структуры и появлением коронального выброса массы.

В начале вспышечного процесса свечение в линии H_{α} возникает в отдельных ярких узлах, которые затем, по мере развития вспышки, сливаются в протяженные светящиеся ленты. Обычно ленты свечения вспышки сдвинуты друг относительно друга, и в ходе ее развития расстояние между ними увеличивается. По современным представлениям, это свидетельствует о восходящем движении зоны энерговыделения в вершине магнитной аркады, где располагается токовый слой.

Считается, что часть выделившейся энергии (основное энерговыделение вспышки локализовано в нижней короне) в форме быстрых частиц и потоков горячей плазмы с возможным образованием ударных волн распространяется вниз, в хромосферу. В солнечной хромосфере под воздействием быстрых частиц возникают вторичные проявления вспышки – свечение вспышечных лент в оптическом и рентгеновском диапазонах спектра с последующим выбросом нагретой плазмы вверх из хромосферы (хромосферное испарение) (рис. 1).

В настоящей работе приведены результаты исследования сравнительно редкого класса вспышечных событий – вспышек вне пятен. Большая часть солнечных вспышек, в том числе и самых мощных, происходит в активных областях, когда магнитное поле в ходе их эволюции приобретает сложную структуру. Однако вспышки вне пятен возникают и в факельных площадках с небольшими пятнами и в областях без пятен, что указывает на существование относительно простых условий, которые могут привести к появлению вспышки. Dodson and Hedeman [12] по результатам изучения большого статистического материала установили, что внепятенные вспышечные события составляют около $\sim 7\%$ от общего числа вспышек балла 2 и выше.

В годы минимальной активности Солнца доля внепятенных вспышек возрастает почти вдвое. Такие вспышки более продолжительные, показывают медленный рост к максимуму и протяженный спад интенсивности (фазы вспышки обычно выражены нечетко). Тем не менее они могут быть достаточно мощными и приводить к протонным событиям [17]. Во время вспышек вне пятен регистрируются также всплески мягкой рентгеновской эмиссии и радиовсплески в микроволновом диапазоне [28].

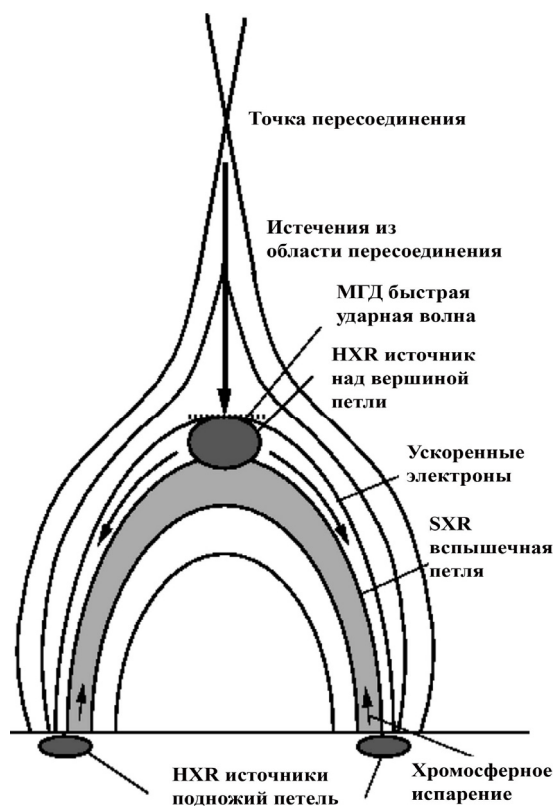


Рис. 1. Схема магнитной структуры солнечной вспышки по высоте [15]

Нами была рассмотрена эволюция пяти внепятенных вспышек: 16 марта 1981 г., 28 июня 2001 г. (две вспышки), 28 мая 2002 г. и 5 июня 2002 г. и выполнено их сравнение с некоторыми моделями вспышек. Наиболее подробно была изучена вспышка 16 марта 1981 г.

Особенности структуры и развития солнечных вспышек вне пятен

Вспышка 16 марта 1981 г. Подробно эта вспышка была описана в предыдущих работах [9; 10]. Она возникла на расстоянии $10^\circ - 20^\circ$ от активных областей AR 512, 514 и 523 и относилась к разряду двухленточных балла 1N (рис. 2). Начало вспышки – в 07:53 UT, продолжительность – 2–2,5 ч. Для ее изучения были использованы данные наблюдений Байкальской астрофизической обсерватории – H_α фильтрограммы и фотогелиограммы полного диска Солнца, а также магнитограммы обсерватории Кит Пик (США). Разрешение фильтрограмм составило 1–1,5 угл. с, что позволило детально изучить динамику тонкой структуры хромосферы.

Эволюция активной области. 9 и 10 марта крупное волокно F и многочисленные короткие волокна указывали на прохождение линии раздела полярности (ЛРП) через активную область AR 512 (рис. 3). На рисунке 3 их положения показаны в соответствующие дни разными цветами.

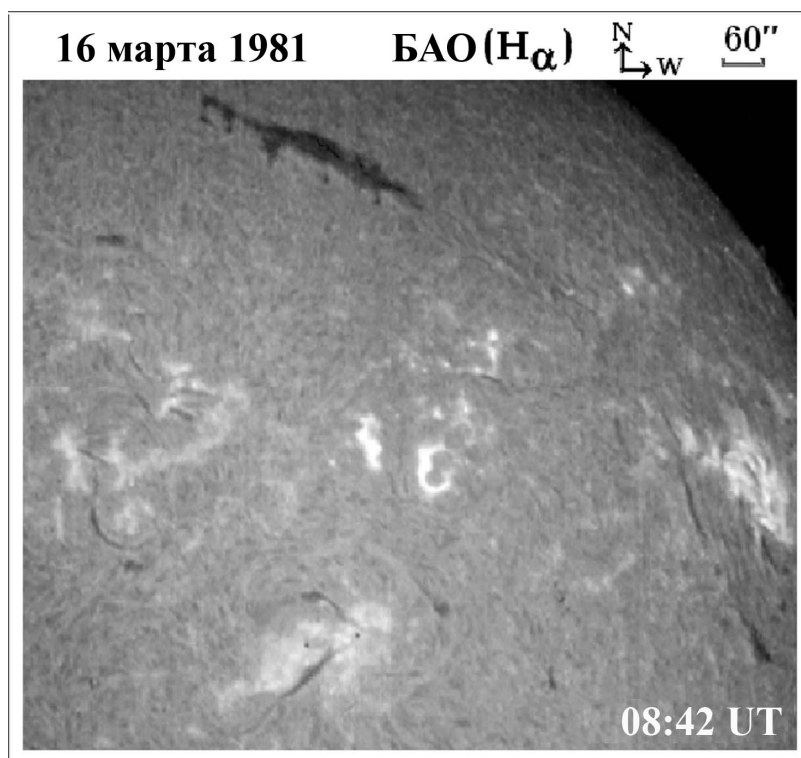


Рис. 2. Внепятенная вспышка 16 марта 1981 г. по наблюдениям в центре линии H_{α}

С 11 марта связь с AR 512 стала ослабевать, что ознаменовало начало формирования новой ЛРП вдоль трассы $L_N L_S$ (рис. 4). В это же время южная часть волокна f увеличилась в длину вдоль границ ячеек супергрануляции A_1 и A_2 . С 12 по 16 марта наблюдался обратный процесс – сокращение южной части волокна с одновременным усилением волокон к северу от f вдоль всей трассы $L_N L_S$. К 16 марта формирование новой ЛРП завершилось.

Предвспышечные активизации стали четко проявляться примерно за час до вспышки (рис. 4). Происходили возмущения тонкой структуры хромосферы, волокон и ячеек хромосферной сетки вдоль и вблизи ЛРП. Наблюдалось усиление и синхронные изменения длины волокон F , f_v и f_n , G_1 и G_2 (коэффициент корреляции составил 0,7–1,0). С периодом 3–4 мин менялась интенсивность темных узлов в области формирования вспышечных лент.

Наблюдалось опускание вещества в темных узлах вблизи будущих вспышечных узлов в центре ячеек супергрануляции A_1 и A_2 . За 25 мин до вспышки в активной области возникли темные вихревые структуры, охватившие ячейки A_1 и A_2 (рис. 5). За несколько минут до вспышки образовались темные ленточные каналы, произошло «продвижение» волокна f вдоль ЛРП к северу и его исчезновение непосредственно перед началом вспышки. Карты магнитных полей показывали тесную связь предвспышечных активизаций с ячейками хромосферной и магнитной сеток.

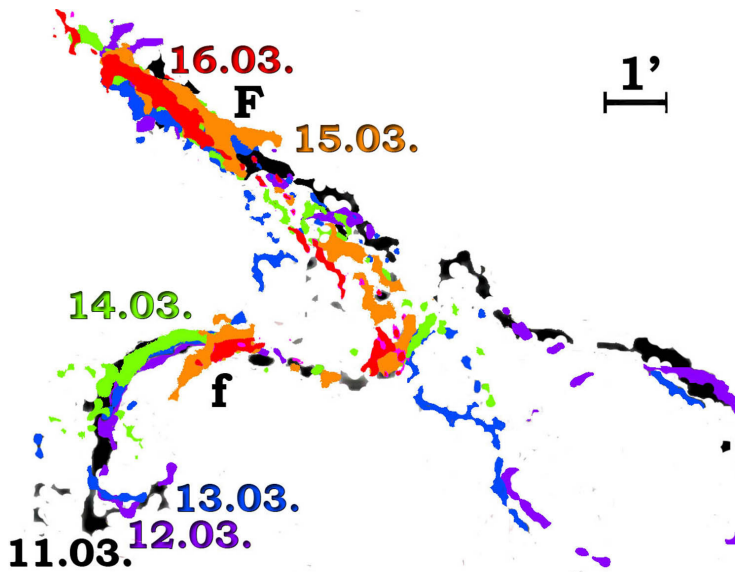


Рис. 3. Схема формирования новой линии ЛРП: F – крупное волокно, удаленное от зоны вспышки на 80 тыс. км; f – волокно в области вспышки

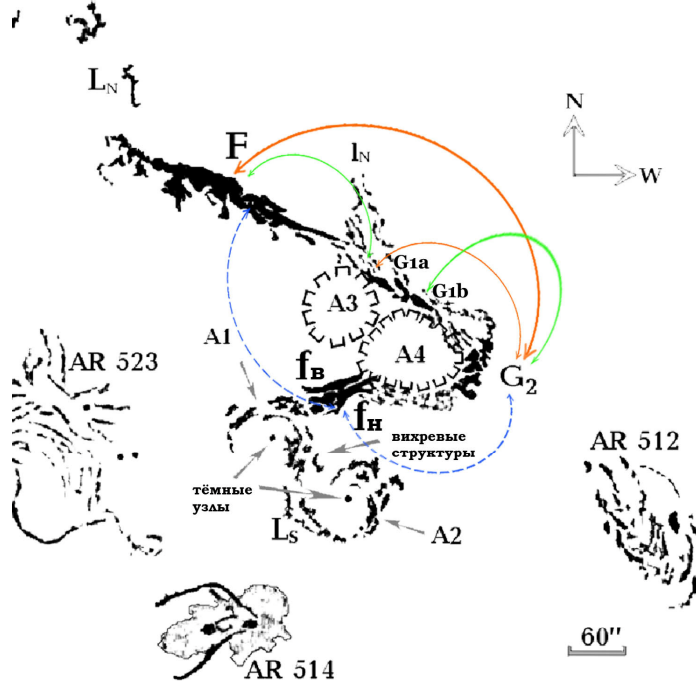


Рис. 4. Схема активизаций хромосферных структур: f_v и f_n – верхняя и нижняя ветвь волокна f ; A_1 – A_4 – ячейки хромосферной сетки, в которых происходила активизация тонкой структуры; $L_N L_S$ – хромосферная трасса, прослеживающая ЛРП продольной составляющей магнитного поля; стрелки показывают корреляционные связи между волокнами ЛРП (красная – коэффициент корреляции в пределах 0,9–1,0; оранжевая – 0,8–0,9; зеленая – 0,7–0,8; синяя пунктирная – коэффициент корреляции отрицательный)

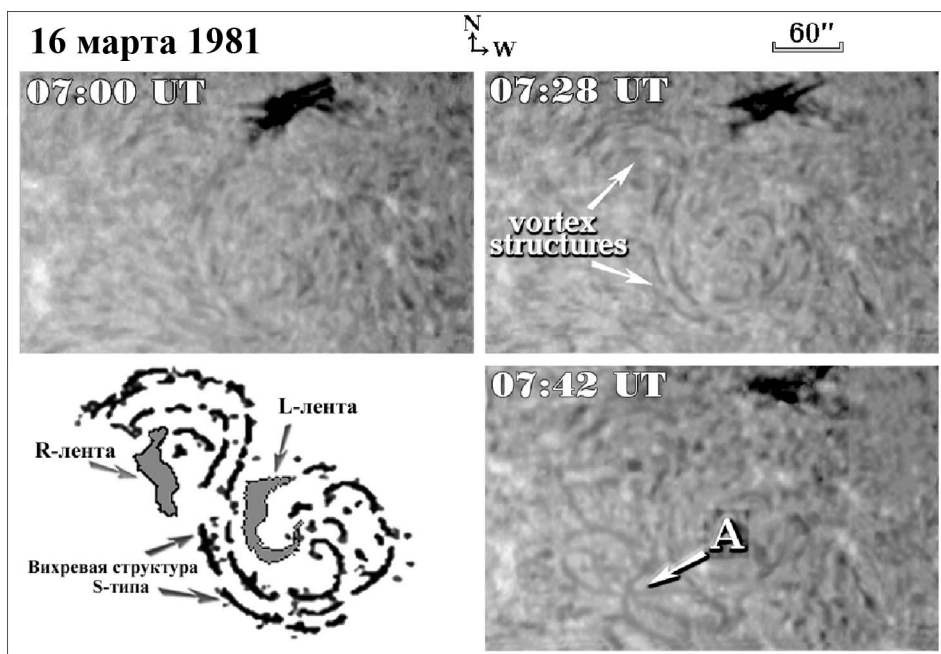


Рис. 5. Предвспышечные активизации тонкой структуры хромосферы 16 марта 1981 г.: А – локализация темных ленточных каналов. Справа сверху – S-образная структура и ленты вспышки

Вспышка. Первые вспышечные узлы в активной области появились вблизи магнитных холмов с напряженностью поля 80–200 Гс на расстоянии примерно 5,5 угл. с (~4 тыс. км) от них. Средние размеры вспышечных узлов составили 4 угл. с (~3 тыс. км). Вспышка отличалась слабой яркостью и значительной удалённостью от ЛРП. Расхождения лент вспышки не наблюдалось.

Развитие вспышки происходило последовательно от холма к холму вдоль границ ячеек хромосферной сетки. Узлы и самые яркие части вспышки, как правило, были локализованы вблизи магнитных холмов с сильным магнитным полем. Некоторые части лент развивались внутри минитоннелей, образованных системами темных арочных структур (рис. 6).

На фазе развития вспышки к максимуму над линией раздела полярности возник яркий стример протяженностью 57 тыс. км (~79 угл. с) (рис. 7). Средняя скорость развития стримера к северу составила порядка 420 км/с. В центральной его части наблюдался подъем вещества, основания (северная и южная части) лежали в областях магнитных холмов. Вслед за появлением стримера в направлении его развития на площади более 18 млн кв. км произошло возгорание узлов хромосферной сетки, возникли удаленные вспышечные узлы.

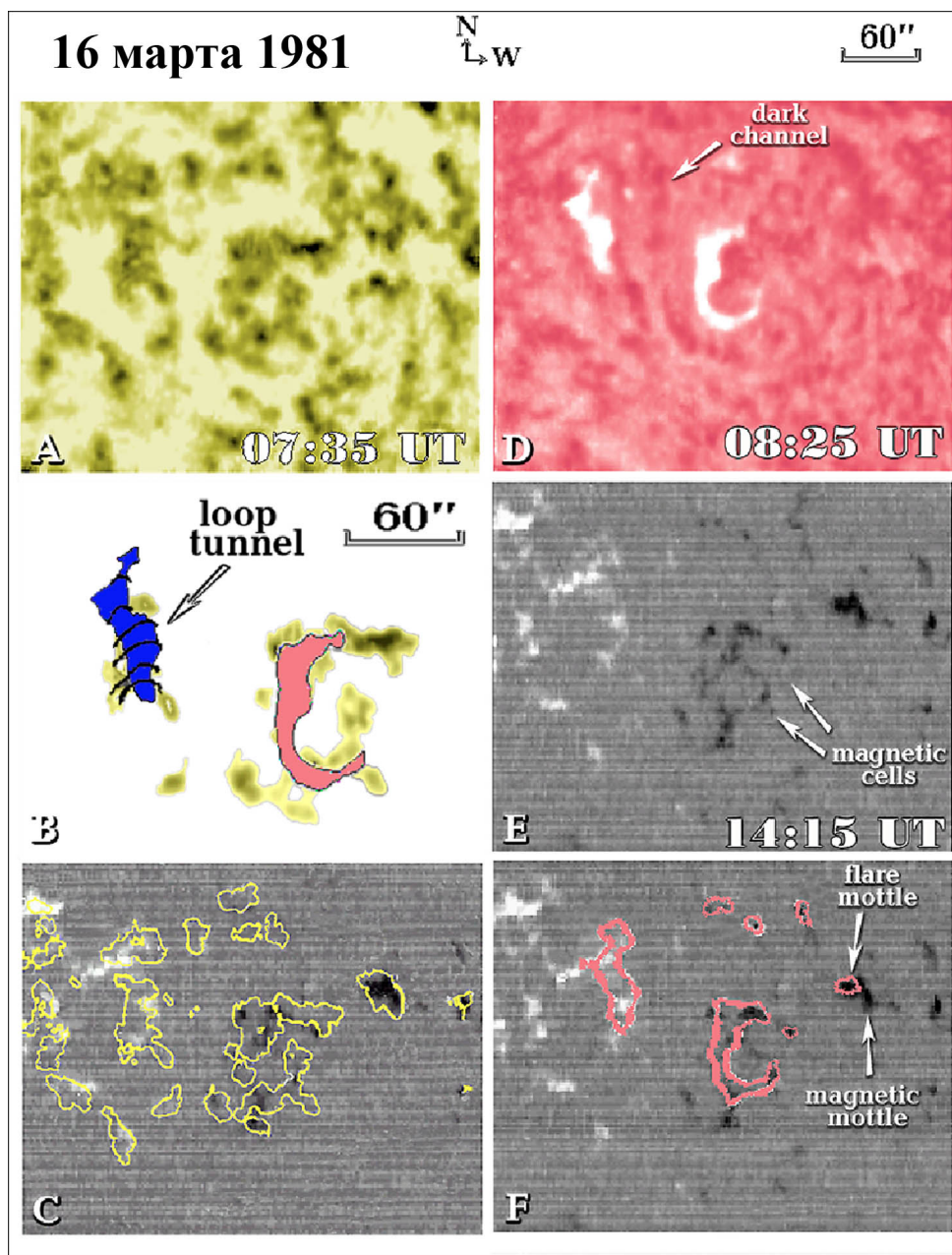


Рис. 6. Внепятенная вспышка 16 марта 1981 г.: А – область вспышки в линии $H_{\alpha}+0,5\text{\AA}$ (07:35UT); В – наложение вспышечных лент на фрагменты кадра 07:35UT; С – магнитограмма обсерватории Kitt Peak с наложением на нее элементов кадра $H_{\alpha}+0,5\text{\AA}$ (07:35UT). D – вспышка в линии $H_{\alpha}+0,25\text{\AA}$ (08:25UT); Е – магнитограмма обсерватории Kitt Peak; F – наложение контуров вспышки на магнитограмму обсерватории Kitt Peak

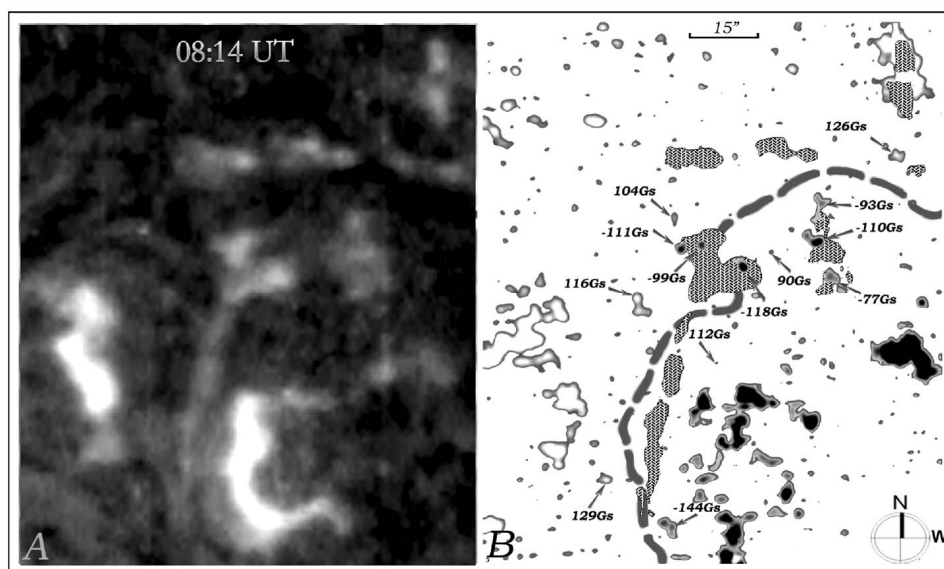


Рис. 7. Внепятенная вспышка: А – в линии H_{α} в 08:14 UT; В – магнитограмма и яркий стример (заштрихован)

Обращает на себя внимание то обстоятельство, что вспышечным процессом были охвачены главным образом долгоживущие хромосферные структуры, которые существовали на стадии эволюции активной области задолго до вспышки. Это относится прежде всего к конвективным ячейкам и волокнам. В частности, темные вихревые структуры S-типа возникли на границе ячеек супергрануляции A_1 и A_2 , которые существовали в активной области 5 дней до вспышки. Тогда же на месте появившегося во время вспышки яркого стримера существовало протяженное волокно, которое к 16 марта значительно ослабло и сократилось (см. рис. 3).

На рисунке 8 показан график изменения площади вспышечных лент со временем, построенный по измерениям площади внутри изофот, составляющих 0,5 максимальной интенсивности вспышки. За нулевой отсчет принималась яркость спокойного участка хромосферы и учитывалось перспективное сокращение.

Изменения площади вспышечных лент в начальный период развития вспышки происходили скачкообразно в виде последовательных взрывных фаз. При этом площадь в начале очередной взрывной фазы падала, а яркость вспышки увеличивалась. В послемаксимальный период изменения площади носили колебательный характер (с периодом, близким к 5 мин). Корреляционный анализ показал, что между лентами и узлами вспышки существуют тесные корреляционные связи (рис. 9). Распад вспышки и уменьшение площади лент происходили в основном за счет ослабления диффузной части вспышки. Самые яркие участки существовали значительно дольше (рис. 16).

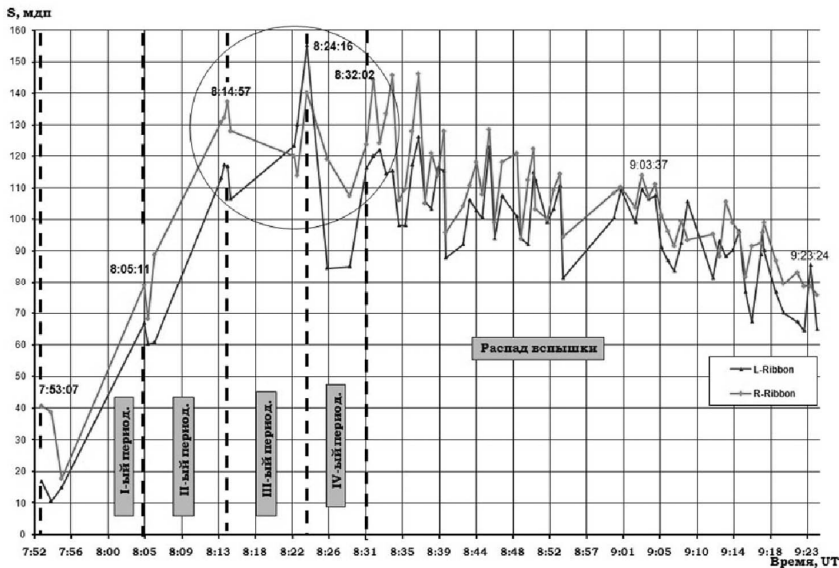


Рис. 8. График изменения площади вспыхечных лент: кружком выделен отрезок асинхронности изменения площади вспыхечных лент

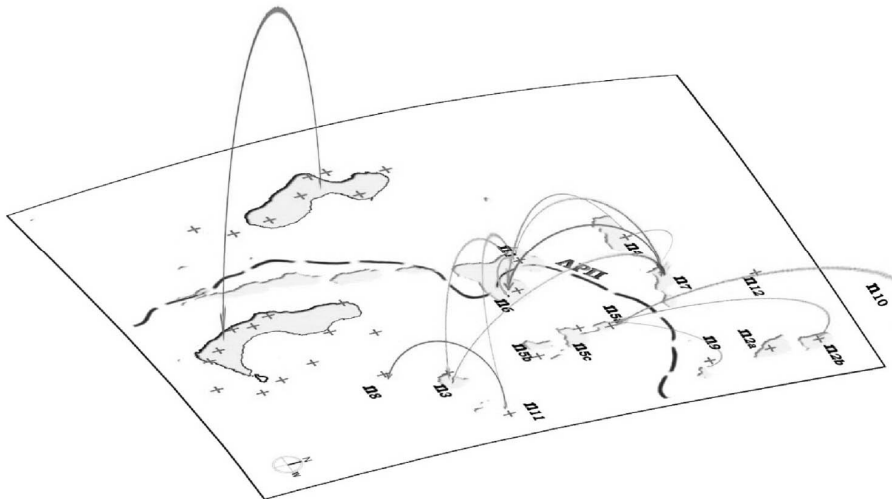


Рис. 9. Схема расположения вспыхечных узлов (n). Корреляционные связи между узлами обозначены стрелками

Вспышка 5 июня 2002 г. Возникла в 09:00 UT вблизи зарождающейся активной области AR 9979 (рис. 10). Ее продолжительность составила порядка 1 ч. Координаты вспышки – S29E24, балл – 1N. Вспышка состояла из двух лент, развивающихся по обе стороны от линии раздела полярностей. Вспышке за 54 мин до ее начала предшествовало возмущение хромосферных структур вдоль и вблизи линии раздела полярности, активизация и выброс волокна. Вспыхечный процесс носил крупномасштабный характер. На

начальной фазе вспышка состояла из отдельных узлов, которые возникли в непосредственной близости от магнитных холмов с напряженностями от 280 до 1300 Гс (рис. 10).

На рисунке 11 положения магнитных холмов указаны стрелками. Вспышка появилась на фазе роста магнитного поля в магнитных холмах 2, 3 (левая лента) и 6 (правая лента). После вспышки структура магнитного поля активной области заметно изменилась.

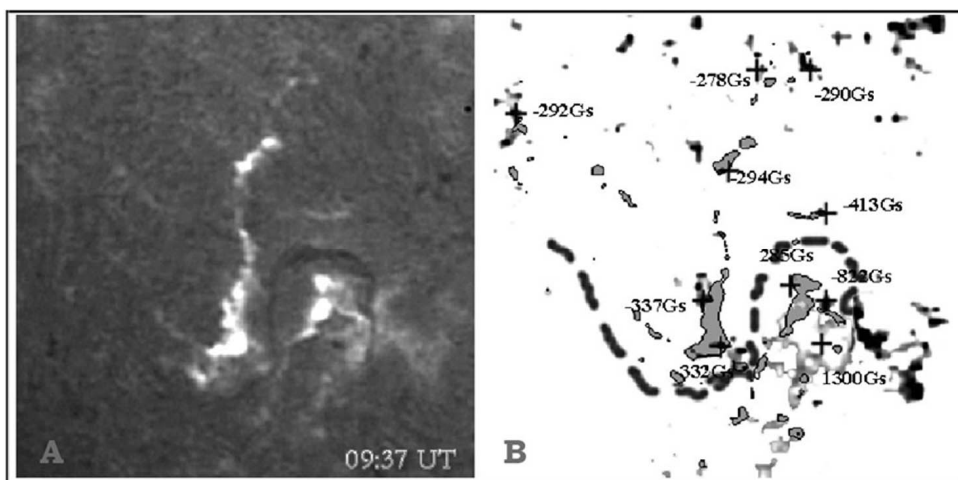


Рис. 10. Вспышка 5 июня 2002 г.: А – в линии H_{α} в максимуме развития; В – магнитограмма поля с наложенными контурами лент эмиссии вспышки; крестиками указаны местоположения магнитных холмов

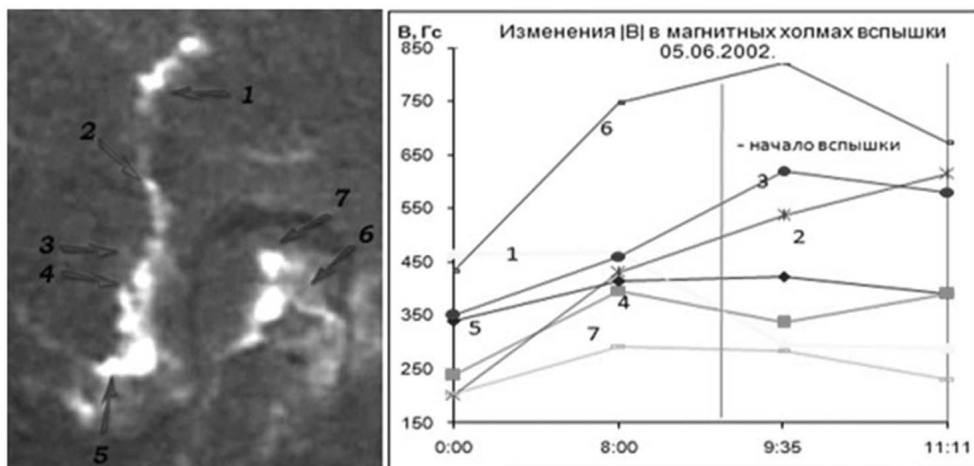


Рис. 11. Изменения магнитного поля в магнитных холмах во вспышке 5 июня 2002 г.

Вспышки 28 июня 2001 г. В активной области произошли две компактные внепятенные вспышки балла SF. Первая вспышка с координатами S11E23 возникла в 05:12 UT, вторая с координатами S14E23 – в 07:23 UT (рис. 12). По данным наблюдений SOHO/MDI, узлы первой вспышки располагались вблизи холмов с напряжённостью поля 91, 223, 102, 218, –204, –231 Гс. Узел второй вспышки появился в непосредственной близости от магнитного холма с напряжённостью поля 141 Гс.

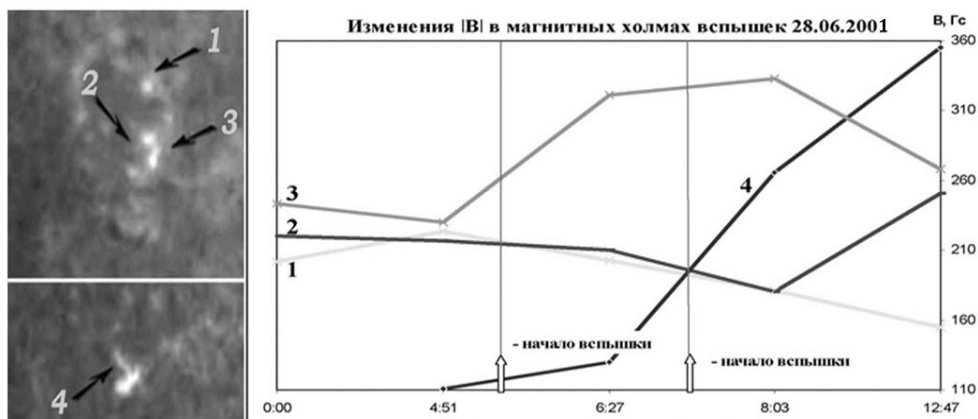


Рис. 12. Изменения поля в магнитных холмах во внепятенных вспышках 28 июня 2001 г.

Первой вспышке (верхнее фото) предшествовало появление трёх волокон, которые исчезли непосредственно перед её началом. За час до вспышки значение поля в магнитном холме 3 (вблизи вспышечного узла) составляло 230 Гс. Спустя три часа после начала вспышки поле возросло почти в 1,5 раза и достигло значения 333 Гс. В холмах 1 и 2 вблизи двух других вспышечных узлов поле за то же время уменьшалось практически одинаково. Судя по характеру изменения магнитного поля в магнитных холмах 2 и 3 (противоположных полярностей), холмы могли составлять связанную замкнутую биполярную систему. До вспышки (в 04:51) и после нее (в 12:47) значения поля в них были практически одинаковы.

Во время второй вспышки в 07:23 UT в этой же активной области в магнитном холме 4 вблизи вспышечного узла поле также существенно увеличивалось: от 111 Гс (за 4 ч до вспышки) до 317 Гс (через 2 ч после вспышки), т. е. возросло почти в 3 раза. Вероятно, в этом месте происходил выход нового магнитного потока. После вспышек в структуре магнитного поля активной области произошли заметные изменения.

Вспышка 28 мая 2002 г. Вспышка имела балл SF. Возникла в 04:20 UT (координаты – S11E10) и состояла из трёх групп узлов (рис. 13).

Вспышка возникла на фоне крупномасштабных изменений магнитного поля активной области. На рисунке 14 стрелки указывают на изменения в структуре магнитного поля до и после вспышки. Вспышечные узлы располагались вблизи магнитных холмов с напряжённостями поля 750, –308 и –223 Гс.

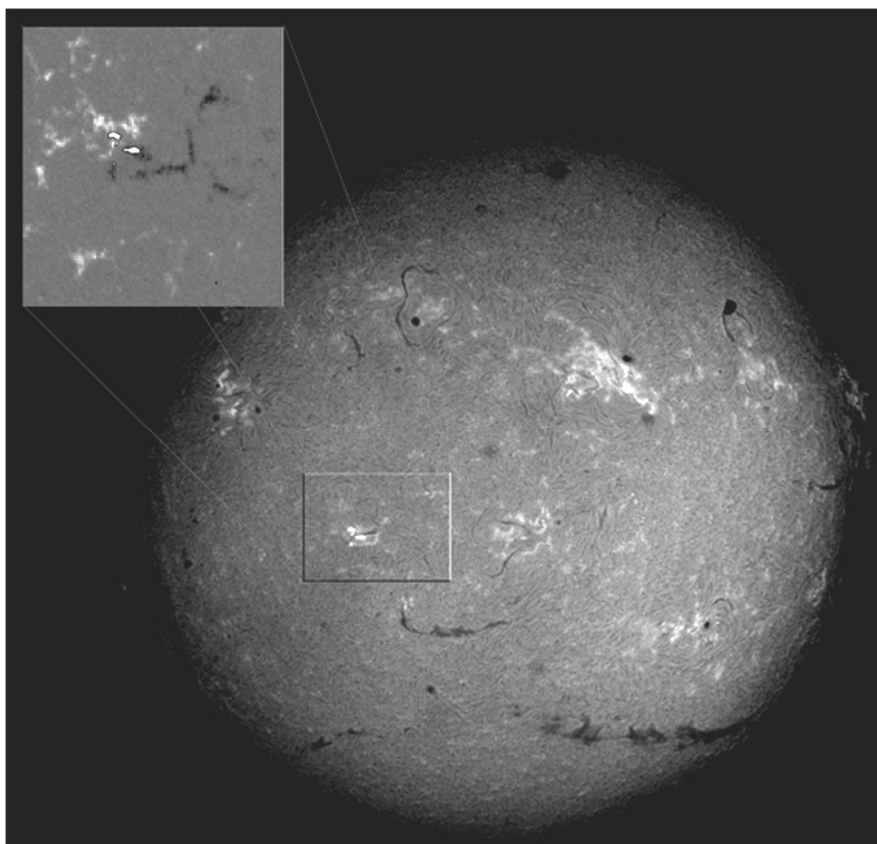


Рис. 13. Внепятенная вспышка 28 мая 2002 г. по наблюдениям в линии H_{α} в Байкальской астрофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН

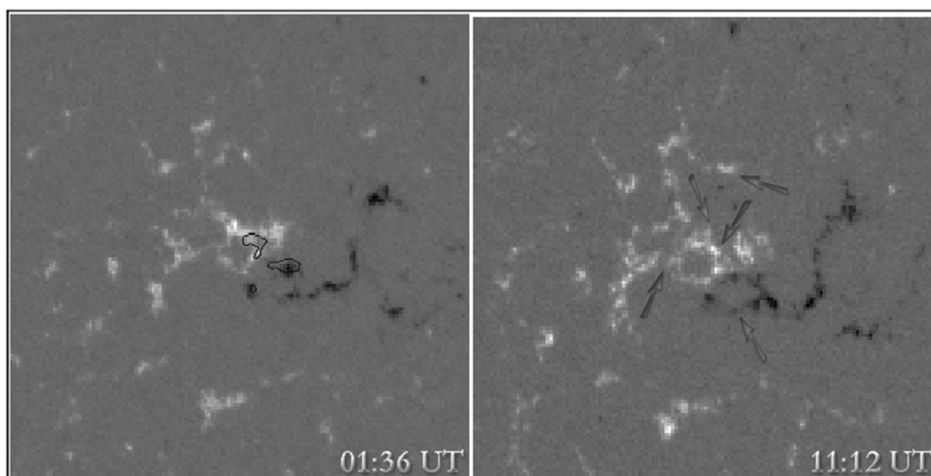


Рис. 14. Внепятенная вспышка 28 мая 2002 г. (показана контуром на магнитограмме SOHO/MDI в 01:36)

Вспышки вне пятен и вспышки в активных областях с пятнами: сходство и различия, интерпретация

Рассмотренные в работе внепятенные вспышки отличались друг от друга по площади, баллам, характеру развития, но тем не менее имели ряд схожих черт. Все вспышки сопровождались изменениями тонкой структуры хромосферы на большой площади, которые носили крупномасштабный характер. Всем вспышкам предшествовали исчезновения волокон. Масштабы возмущений хромосферы и характер развития вспышек определялись прежде всего топологией магнитного поля всей области активизации. Наблюдаемые структурные элементы внепятенных вспышек были тесным образом связаны с границами хромосферной и магнитной сетки. Узлы свечения вспышек располагались, как правило, в непосредственной близости от холмов сильного магнитного поля. Развитие лент вспышек происходило постепенно и последовательно, от одного магнитного холма к другому. Самое продолжительное время существовали наиболее яркие участки вспышки, которым, как известно, соответствуют основания ярких петельных структур в мягком рентгеновском диапазоне спектра [27]. Во время вспышек происходили крупномасштабные изменения магнитного поля активных областей, в том числе существенно менялась напряженность поля в магнитных холмах вблизи вспышечных узлов. Отдельные выводы подтверждаются результатами работ других авторов.

В работе [12] описаны морфологические свойства мощной внепятенной двухленточной вспышки 23 апреля 1981 г. Было показано, что двухленточная вспышка вне пятен связана с активизацией и внезапным исчезновением неподвижного волокна, лежащего в области вспышки. В то же время волоконца, окружающие волокно, в течение 24 ч перед вспышкой подвергались большим изменениям. Их изменение имело характер развития параллельно волокну, в отличие от первоначальной перпендикулярной направленности. В работе [26] проанализирована активизация H_{α} -волокна, имеющего форму петли перед началом внепятенной двухленточной вспышки 9 мая 1979 г. Завихрение, наблюдаемое в волокне, указывало на возможную неустойчивость. За переориентацию волокна были ответственны наблюдаемые движения факельной площадки. Позднее авторы [27] проанализировали вспышки в спокойных областях, не связанных с какой-либо активизацией волокна. Было обнаружено, что в возникновении внепятенных вспышек важную роль играют вращения факельных площадок, которые приводят к магнитному сдвигу и накоплению энергии. Как только сдвиг достигает определенного значения, набор неустойчивостей инициирует высвобождение накопленной энергии в виде вспышки. Показано, что сдвиг в 2° 3 марта 1983 г. не привел к вспышке, тогда как сдвиг в 18° , наблюдаемый на следующий день, вызвал вспышку. Было сделано предположение, что два противоположно направленных поля в форме факельных площадок при столкновении друг с другом приводят к пересоединению силовых линий в нейтральном слое и инициируют вспышку. В работе [22] показано, что вспышка вне пятен 29 июля 1973 г.

произошла вслед за активизацией и исчезновением большого темного волокна, которое было вложено в систему корональных петель, видимую в рентгеновском диапазоне. Активизация большого волокна ознаменовала начало развития неустойчивости в магнитном поле, которая, в конечном счете, привела к извержению волокна. Выброс волокна привел к открытию первоначально закрытого поля и началу коронального и хромосферного нагрева, наблюдаемого в виде вспышки. В работе [20] было сделано заключение, что на стадии подготовки внепятенной вспышки в активной области должна существовать биполярная структура магнитного поля. Вспышки локализируются по разные стороны от нейтральной линии или около нее. Неподвижные темные волокна над нейтральной линией активизируются за несколько часов и за один или два дня до вспышки. Происходят изменения углов наклона волоконца относительно волокна в сторону уменьшения углов. Самое близкое к положению вспышки волокно сначала увеличивается, сопровождаясь увеличением яркости флоккулов. За несколько минут до вспышки или во время вспышки это волокно быстро слабеет или исчезает.

Как следует из приведенных фактов и полученных нами результатов, большинство событий и явлений, сопровождающих внепятенные вспышки, наблюдаются и у вспышек в сложных активных областях с пятнами. В работах Банина [2] и Боровика [3] с сотрудниками было показано, что вспышечная активность и другие явления, сопровождающие крупные вспышки в комплексах активности и малые вспышки в развивающейся активной области, происходят и развиваются на границах ячеек с размерами, равными размерам супергранул. В целом ряде работ была найдена положительная корреляция положений крупных вспышек с горизонтальными сдвиговыми движениями вблизи ЛРП [16; 29]. Хорошо известна связь между появлением вспышек и выходом нового магнитного потока в активной области [24]. В работе [4] была отмечена некоторая связь между вспышками вне пятен и отдаленными пятнами активных областей.

Одно из основных отличий внепятенных вспышек от вспышек в активных областях с пятнами заключается в том, что они развиваются не в сложных, а относительно простых магнитных конфигурациях: в факельных площадках, в областях без пятен или с очень небольшими пятнами. Структурными элементами магнитного поля, изменения в которых при определенных условиях способны привести к возникновению вспышки, являются отдельные узлы и холмы магнитного поля на границе конвективных ячеек.

Опираясь на вышесказанное, для интерпретации результатов наблюдений внепятенных вспышек можно использовать «полуэмпирическую» модель вспышечного процесса на основе наблюдательных данных, которая была предложена в работе [14] (рис. 15).

В этой схеме сама вспышка является процессом релаксации избытка энергии в активной конфигурации поля. Более того, предложенная схема позволяет придать физический смысл многим основным наблюдательным признакам предвспышечной ситуации, таким как деформация ЛРП, выход нового магнитного потока, активизация волокна над ЛРП и т. д. В совре-

менных моделях вспышек (особенно в численном моделировании) часто используется условие закрепленности или «заякоренности» концов силовых линий поля в фотосфере. Второе важное условие, следующее непосредственно из наблюдательных данных, – это совпадение линии раздела полярностей поля в активных областях с особенностями поля скоростей в них – сдвиговыми (и более сложными) течениями вещества. В изложенной схеме эти условия играют ключевую роль. Сдвиговые течения в слоях жидкости или газа при определенных условиях способны приводить к неустойчивости Кельвина – Гельмгольца (К – Г) с образованием системы вихрей на поверхности раздела скорости. В работе [14] были выполнены соответствующие оценки и показано, что при существующих скоростях плазмы в области вспышек критерий развития неустойчивости К – Г не выполняется, и следовательно, для возбуждения системы вихревых движений в области сдвиговых движений необходимы конечные возмущения в области ЛРП, что, по-видимому, и наблюдается. Конечно, нельзя исключить возможность появления более высоких скоростей и развития неустойчивости К – Г в области вспышек (и такие работы известны).

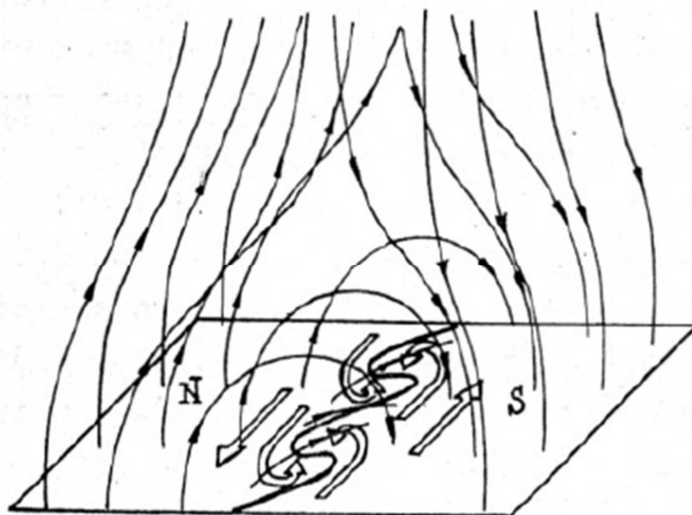


Рис. 15. Полуэмпирическая трехмерная модель магнитной структуры вспышки [13]. Конфигурация магнитного поля над фотосферой и горизонтальное поле скоростей в окрестности линии раздела полярностей вспышечной области. Обозначения: полужирная линия – линия раздела полярностей; тонкие линии – силовые линии магнитного поля; стрелки – направления движений вещества в плоскости фотосферы

В работе [14] на примере крупной протонной вспышки 4 августа 1972 г. была сделана попытка обнаружить вихревые и сдвиговые течения в горизонтальном поле скоростей в активной области. Была рассмотрена упрощенная модель изменений вмороженного магнитного поля, которые были вызваны таким полем скоростей на временном интервале порядка нескольких часов, что позволяло пренебречь диффузией поля. По нескольким маг-

нитограммам поля V_z , полученным в обсерватории Кит Пик, было восстановлено плоское поле скоростей в этой активной области в окрестности ЛРП. Вычисления показали, что экстремумы завихренности поля скоростей перед ее началом были сконцентрированы вблизи ЛРП. Во время предвспышечного периода вихревые структуры были более компактными по абсолютной величине и плотно заполняли ограниченную зону вблизи ЛРП; после вспышки распределение вихрей приобрело преимущественно дисперсный характер, а их величины уменьшились. Следует подчеркнуть, что во время начальной фазы вспышки яркие ядра ее свечения совпали с локальными максимумами поля скоростей в предвспышечный период. Изложенная физическая модель вполне пригодна для использования в прогнозе вспышек, поскольку такая характеристика активных областей, как магнитная спиральность, и в особенности её рост, считается важным предиктором возникновения вспышек. Эта модель применима и для интерпретации рассматриваемых вспышек вне пятен, поскольку здесь используются данные наблюдений в хромосфере.

Взаимодействие структурных образований различных масштабов, например ячеек супергрануляции и более крупных (см. введение) перед внепятенной вспышкой 16 марта 1981 г., на наш взгляд, привело в активной области к генерации сдвиговых движений вблизи ЛРП (рис. 16) и образованию вихрей (см. рис. 5).

Об этом свидетельствует и тот факт, что развитие лент вспышки шло вдоль ЛРП навстречу друг к другу (см. рис. 16). Мера сдвига – величина отношения расстояния между наиболее удаленными концами лент вспышки к минимальному расстоянию между ними – достигает ~ 4 , что было замечено для ряда вспышек ранее в работе Матюхина и Томозова [5]. Угол сдвига составил 51° .

Вихревые движения вещества в фотосфере привели к локальным усилениям магнитного поля вдоль ЛРП и, как следствие, к накоплению избытка непотенциальной энергии в магнитной конфигурации в нижней короне и образованию там токового слоя. Изменение и усложнение магнитных полей сдвиговыми движениями вещества фотосферы вместе с системой генерируемых вихрей привело магнитную конфигурацию в неравновесное состояние с последующим выбросом волокна и инициированием вспышки (рис. 17).

После превышения порога устойчивости магнитной структуры накопленная энергия начала быстро освобождаться, приводя к началу вспышки. Роль спускового механизма в этом случае играет всплывающий поток, который приводит к высвобождению накопленной энергии в гораздо более обширной области вышележащего поля. Своеобразный туннель из системы тонких темных волокон, в пределах которого развивалась одна из лент вспышки 16 марта 1981 г. (см. рис. 6), вероятно, был связан с выходом нового магнитного потока в этой области. Хейвертс и др. [18], а также Прист [6] показали, что если новый поток всплывает вблизи униполярного поля у края активной области, то может возникнуть вспышка в виде простой петли. Появление нового потока в активной области вблизи поля со сдвигом около волокна может привести к образованию двухленточной вспышки.

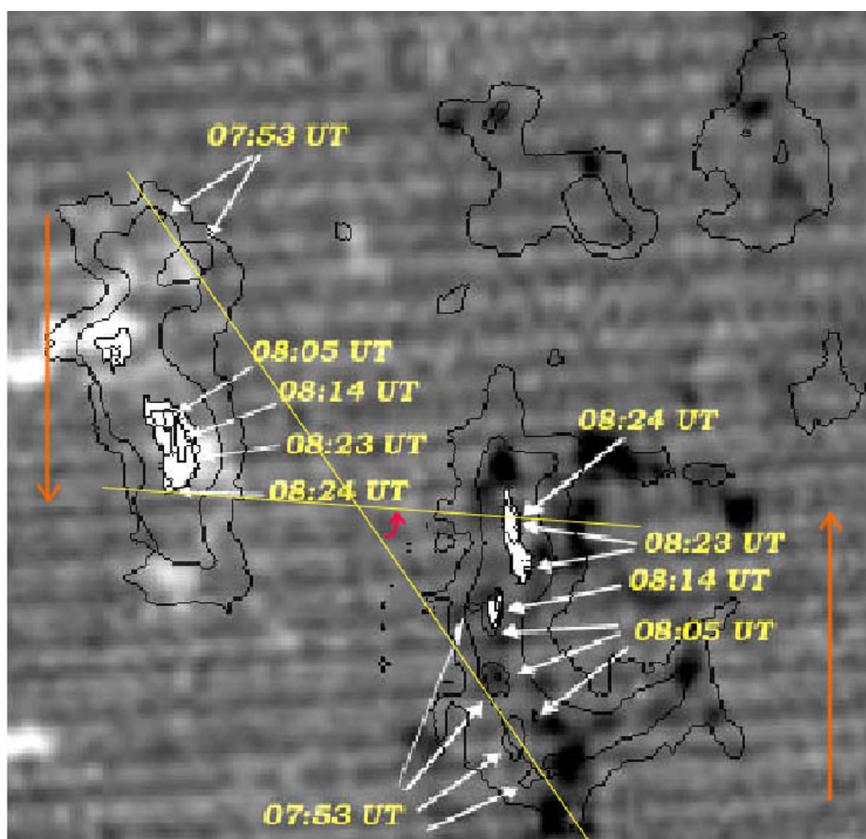


Рис. 16. Наложение на магнитограмму контуров вспышечных лент в 08:24 UT и контуров максимальной яркости вспышечных лент. Стрелками показаны места максимальной яркости лент вспышки (в 07:53, 08:05, 08:14, 08:23 и 08:24 UT)

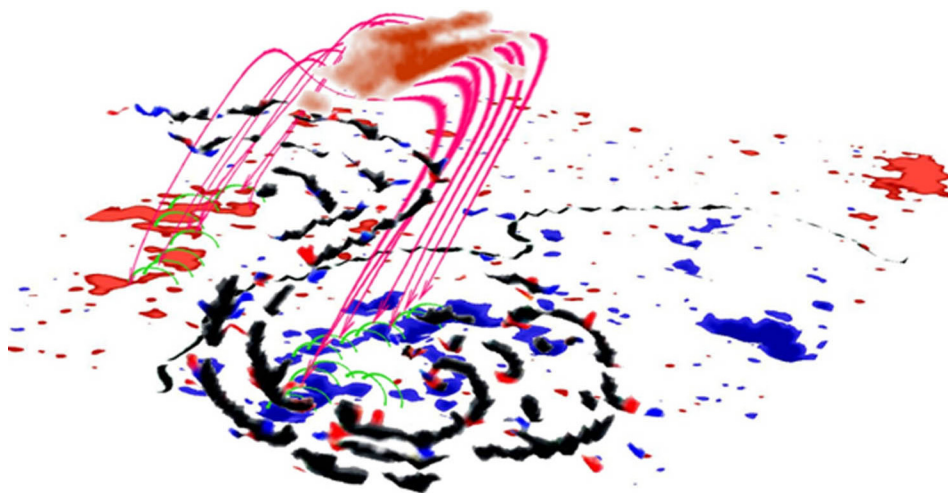


Рис. 17. Схема развития вспышки 16 марта 1981 г.

Необходимо отметить, что хотя сама вспышка являлась локальным явлением, условия для ее возникновения определялись крупномасштабным полем скоростей всей магнитной структуры. Это, в частности, хорошо было видно по изменениям структуры магнитных полей в активных областях внепятенных вспышек 28 июня 2001 г., 28 мая 2002 г. и 5 июня 2002 г. (см. рис. 11, 12).

Динамика развития и движений лент вспышки является ценным источником информации о процессах в самой области энерговыделения вспышки. Когда вспышки изучались, в основном, в оптическом диапазоне спектра, то главное внимание уделялось движениям и динамике свечения вспышечных лент (см. обзор [13]). Так, например, если ленты свечения вспышки в процессе ее развития расходятся в стороны от ЛРП, то это может означать, что область выделения энергии поднимается вверх. Высоту зоны энерговыделения можно грубо оценить, предполагая полукруговую форму магнитных силовых линий. В описанном нами случае вспышки 16 марта 1981 г. вспышечные ленты двигались лишь вдоль ЛРП, что означает, что область выделения энергии находилась на фиксированной высоте (примерно на высоте 40 тыс. км). Скачкообразный рост площади лент вспышки, сопровождаемый увеличением их яркости (рис. 8), был связан, вероятно, с динамикой области выделения энергии. Выделение энергии происходило постепенно в различных арках, и каждому элементарному вспышечному всплеску соответствовало выделение энергии в отдельной магнитной трубке (характерные времена выделения энергии 5–10 мин, времена перехода между волокнами тонкой структуры токового слоя – меньше минуты). С динамикой области выделения энергии, по-видимому, было связано и возникновение вблизи ЛРП на максимальной фазе развития вспышки более слабой протяженной области свечения вспышки (стримера) (см. рис. 7). После выброса волокна за ним мог сформироваться токовый слой с быстрым выделением свободной (токовой) энергии магнитных полей.

Во время внепятенной вспышки 16 марта 1981 г. в окружающей хромосфере появлялись многочисленные близлежащие и удаленные от лент вспышечные узлы. Узлы были связаны с крупномасштабным развитием самой солнечной вспышки. В работе [23] отмечено, что такие поярчения имеют однополярный характер и вызваны хромосферным испарением в результате высыпания электронов. На рисунке 18 представлена модель пересоединения между всплывающей трубкой потока (толстая черная линия) и ранее существующими открытыми линиями поля (серые линии), которая объясняет наблюдавшиеся последовательные хромосферные поярчения (ПХП). Тонкой линией со стрелкой вверх показано направление движения. Результат пересоединения между закрытым и открытым полем (рис. 18, В) отмечен пунктирной линией. Электроны ускоряются в направлении хромосферы (маленькая волнистая стрелочка) и формируют ПХП (выделено кружочком). Впоследствии скрученная трубка потока приводит к развитию ПХП в основаниях других открытых силовых линий.

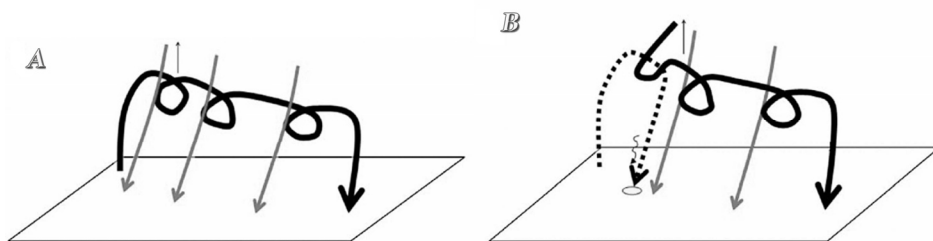


Рис. 18. Модель пересоединения магнитных полей между выходящей трубкой потока и открытыми силовыми линиями: А – структура поля до начала магнитного пересоединения; В – пересоединение между закрытым и открытым магнитным полем

Заключение

По результатам анализа вспышек вне пятен можно констатировать, что эти вспышки обладают сходными характеристиками с нормальными вспышками в активных областях и демонстрируют подобные морфологические признаки в своем развитии. Их основное отличие заключается в том, что они происходят не в сложных магнитных конфигурациях, а в факельных площадках и в областях без пятен, что указывает на возникновение относительно простых ситуаций в солнечной хромосфере и короне, которые способны привести к появлению вспышек. Тем не менее во вспышках вне пятен происходят выбросы волокон и генерация рентгеновского и радиоизлучения, как и в обычных вспышках. Вспышки вне пятен способны быть и источниками протонных событий, которые приводят к геомагнитным бурям.

Нестационарные процессы на Солнце – вспышки и выбросы корональной массы – способны оказывать сильное воздействие на магнитосферу Земли, функционирование космических аппаратов, ионосферу и распространение в ней радиоволн. Солнечные вспышки и связанные с ними выбросы корональной массы могут сильно возмущать магнитосферу Земли, вызывая магнитные бури и полярные сияния. Вследствие этого изучение условий возникновения вспышек вне пятен в хромосферных линиях, в частности в линии H_{α} , и анализ данных в сочетании с наблюдениями в рентгеновском и радио-диапазонах представляет большой интерес для выяснения природы и механизма солнечных вспышек.

Список литературы

1. Солнечные вспышки / А. Т. Алтынцев, В. Г. Банин, Г. В. Куклин, В. М. Томозов. – М. : Наука, 1982. – 246 с.
2. Банин В. Г. Ячеистые структуры комплекса активности и их влияние на развитие больших солнечных вспышек / В. Г. Банин // Исслед. по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца. – 1984. – Вып. 68. – С. 73–83.
3. Боровик А. В. Эволюция активной области СД № 135 в июне 1984 г. и ее связь с крупномасштабными магнитными полями на Солнце / А. В. Боровик,

В. М. Григорьев, Н. Н. Каргаполова // Тр. Астрон. обсерватории Скалнате Плесо. – 1986. – Т. 15, ч. 1. – С. 211–242.

4. Жукова О. В. Вспышки вне пятен в 22 цикле солнечной активности / О. В. Жукова, С. А. Язев // Исслед. по геомагнетизму, аэронамии и физике Солнца. – 2001. – Вып. 113. – С. 136–140.

5. Матюхин Ю. Г. Квазистатическая эволюция магнитных структур на Солнце и их топологическая перестройка / Ю. Г. Матюхин, В. М. Томозов // Астрон. журн. – 1991. – Т. 68, вып. 1. – С. 158–165.

6. Прист Э. Солнечная магнитогиродинамика / Э. Прист. – М. : Мир, 1985. – 413 с.

7. Прист Э. Магнитное пересоединение. Магнитогиродинамическая теория и приложения / Э. Прист, Т. М. Форбс. – М. : Физматлит, 2005. – 591 с.

8. Quasi-static evolution of a three-dimensional force-free magnetic flux tube or arcade / J. J. Aly, C. T. Russell, E. R. Priest, L. C. Lee // Physics of Magnetic Flux Ropes. Geophysical Monographs Ser. – 1990. – Vol. 58. – P. 235–239.

9. Borovik A. V. The spotless flare of 16 March 1981 – I. Pre-flare activations of the chromospheric fine structure / A. V. Borovik, D. Yu. Myachin // Solar Physics. – 2002. – Vol. 205. – P. 105–116.

10. Borovik A. V. Structure and development of the spotless flare on March 16, 1981 / A. V. Borovik, D. Yu. Myachin // Geomagnetism and Aeronomy. – 2010. – Vol. 50. – P. 937–949.

11. Cao T. Morphological properties of major spotless two-ribbon flare on 23 April 1981 / T. Cao, F. Hu, G. Xie // Scientia Sinica, Series A – Mathematical, Physical, Astronomical and Technical Sciences. – 1983. – Vol. 26. – P. 972–977.

12. Dodson H. W. Major H α flares in centers of activity with very small or no spots / H. W. Dodson, E. R. Hedeman // Solar Physics. – 1970. – Vol. 13. – P. 401–419.

13. Fletcher L. An observational overview of solar flares / L. Fletcher, B. R. Dennis, H. S. Hudson // Space Science Reviews. – 2011. – Vol. 159. – P. 19–106.

14. The role of large-scale velocity fields in producing a pre-flare situation / A. A. Golovko, G. V. Kuklin, A. V. Mordvinov, V. M. Tomozov // Solar Maximum Analysis. Additional Issue / eds. V. E. Stepanov, V. N. Obridko, G. Ya. Smolkov. – Novosibirsk: Nauka, 1988. – P. 278–290.

15. Harra L. K. Solar flares – the observations / L. K. Harra // Mem S. A. It. – 2007. – Vol. 78. – P. 236–241.

16. Harvey K. L. A study of the magnetic and velocity fields in an active region / K. L. Harvey, J. W. Harvey // Solar Physics. – 1976. – Vol. 47. – P. 233–246.

17. Hejna L. A few comments on the two-ribbon flare without sunspots of 29 July 1973 / L. Hejna // Bull. Astron. Inst. Czech. – 1975. – Vol. 26. – P. 119–125.

18. Heyvaerts J. An emerging flux model for solar flare phenomenon / J. Heyvaerts, E. R. Priest, D. M. Rust // Astrophys. J. – 1977. – Vol. 216. – P. 123–137.

19. Hughes D. Solar flares as cascade of reconnecting magnetic loops / D. Hughes, M. Paczunski, R. O. Dendy // Phys. Rev. Lett. – 2003. – Vol. 90. – P. 131.

20. Luo B. // Solar Physics and Interplanetary Travelling Phenomena: Proceedings of the Kunming Workshop / eds. C. de Jager, Biao Chen. – Beijing : Science Press, 1985. – Vol. 1. – P. 718.

21. Matyukhin Yu. G. The quasi-static evolution of magnetic configurations on the Sun and solar flares / Yu. G. Matyukhin, V. M. Tomozov // Physics of Magnetic Flux Ropes. Geophysical Monographs Ser. / eds. C. T. Russell, E. R. Priest, L. C. Lee. – 1990. – Vol. 58. – P. 241–244.

22. Moore R. L. Solar and Interplanetary Dynamics / R. L. Moore, B. J. La Bonte // IAU Symp. / eds. M. Dryer, E. Tandberg – Hansen. – 1980. – Vol. 91. – P. 207.
23. Pevtsov A. Sequential chromospheric brightening: The case for chromospheric evaporation / A. Pevtsov, K. S. Balasubramaniam, R. A. Hock // Adv. Space Res. – 2007. – Vol. 39. P. 1781.
24. Priest E. R. Magnetic reconnection at the Sun / E. R. Priest // Magnetic reconnection in space and laboratory plasmas; Proc. of the Chapman conf. on magnetic reconnection. – Los Alamos, NM. Washington, DC, AGU, 1984. – P. 63–78.
25. Sundara Raman K. Filament activity in a quiet region flare / K. Sundara Raman, S. Gupta, R. Selvendran // J. Astrophys. Astr. – 1993. – Vol. 14. – P. 45–52.
26. Sundara Raman K. On the triggering of quiet region flares without filament activation / K. Sundara Raman, R. Selvendran, R. Thiagarajan // Bull. Astr. Soc. India. – 1997. – Vol. 25. – P. 533–540.
27. Švestka Z. Study of post-flare loops on 29 July 1973 / Z. Švestka, H. W. Dodson-Prince, S. F. Martin // Solar Physics. – 1982. – Vol. 78. – P. 271–285.
28. Vršnak B. Interaction of an erupting filament with ambient magnetoplasma and escape of electron beams / B. Vršnak, K. -L. Klein, A. Warmuth // Solar Physics. – 2003. – Vol. 217. – P. 187–198.
29. Zirin H. The flares of August 1972 / H. Zirin, K. Tanaka // Solar Physics. – 1973. – Vol. 32. – P. 173–207.

Observations of Spotless Solar Flares in Baikal Astrophysical Observatory of the ISTP SB RAS and their Interpretation

A. V. Borovik, D. Yu. Myachin, V. M. Tomozov

Abstract. Five spotless solar flares were analyzed using chromospheric observations in the $H\alpha$ line. The flares were registered in Baikal Astrophysical Observatory ISTP SD RAS on March 16, 1981, June 28, 2001 (two flares), May 28, 2002 and June 5, 2002. We also used the photospheric observational data from other observatories and magnetic field data from the Kitt Peak Observatory (USA) and SOHO/MDI. The flare of March, 16 1981 was used to study the active region evolution and preflare chromospheric activations were studied in details. Noteworthy is the fact of appearance of S-type the vortex structure close to the polarity reversal line before this flare. In details it was studied the structure and development of some spotless flares. We established a close connection of flare ribbons and nodes with boundaries of chromospheric and magnetic networks, with magnetic hills having a high magnetic field values. The majority of examined flares were shown to appear at the magnetic field rise phase in magnetic hills of active regions. We explain the appearance and structural evolution of spotless flares using the state-of-the-art solar flare models.

Keywords: Solar-terrestrial physics, solar activity, solar flares.

*Боровик Александр Васильевич
кандидат физико-математических наук,
заведующий обсерваторией
Институт солнечно-земной физики
СО РАН*

*664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126а
тел.: (3952) 79–27–40*

*Borovik Alexandr Vasil'evich
Candidate of Sciences (Physics and Mathematics),
Head of the Observatory
Institute of Solar-Terrestrial Physics
SB RAS*

*126a, Lermontova st., Irkutsk, 664033
tel.: (3952) 79–27–40*

Мячин Даниил Юрьевич
научный сотрудник
Институт солнечно-земной физики
СО РАН
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126а
тел.: (3952) 64-39-01

Myachin Daniil Yur'evich
Research Scientist
Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS
126a, Lermontova st., Irkutsk, 664033
tel.: (3952) 64-39-01

Томозов Владимир Михайлович
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник
Институт солнечно-земной физики
СО РАН
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126а
тел.: (3952) 56-45-46

Tomozov Vladimir Michailovich
Candidate of Sciences (Physics and
Mathematics), Senior Researcher
Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS
126a, Lermontova st., Irkutsk, 664033
tel.: (3952) 56-45-46