
ДИНАМИКА МЕЛКОМАСШТАБНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ПЕРЕД МАЛЫМИ И КРУПНЫМИ СОЛНЕЧНЫМИ ВСПЫШКАМИ DYNAMICS OF SMALL-SCALE MAGNETIC FIELDS BEFORE SMALL AND LARGE SOLAR FLARES

А.В. Боровик

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, aborovik@iszf.irk.ru*

А.А. Жданов

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, azhdanov@iszf.irk.ru*

A.V. Borovik

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, aborovik@iszf.irk.ru*

A.A. Zhdanov

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, azhdanov@iszf.irk.ru*

Аннотация. По данным наблюдений SDO (Solar Dynamics Observatory) исследовалась динамика продольного магнитного поля активной области (АО) NOAA 12673. За время прохождения АО по диску Солнца пятна и фоновые поля в ней показывали сложные траектории движения, при этом наблюдалось образование многочисленных короткоживущих локальных мелкомасштабных линий раздела полярностей (ЛЛРП), которые формировались при появлении в АО новых магнитных потоков и их сближении с полями противоположной полярности. Протяженность таких ЛЛРП составляла менее 15000 км (~20 угл. сек), время существования — несколько часов. Исследование вспышечной активности NOAA 12673 показало, что вспышки малой мощности (оптический класс S, площадь <2 кв. град) обычно происходят вблизи ЛЛРП. Перед малыми вспышками, а также перед крупной вспышкой 06.09.2017 (оптический балл 3В, рентгеновский класс X9.3) на ограниченных участках локальных и главной ЛРП АО наблюдались сдвиговые напряжения магнитного поля и рост $\text{grad}H$: в области вспышек малой мощности — до значений 1.3–1.5 Гс/км, в области крупной вспышки — 3–3.5 Гс/км. Полученные результаты свидетельствуют о том, что перед малыми и крупными вспышками продольное магнитное поле ведет себя аналогичным образом.

Ключевые слова: вспышки, магнитное поле, линии раздела полярности.

Abstract. We have examined the dynamics of the longitudinal magnetic field of active region NOAA 12673, using data from the Solar Dynamics Observatory (SDO). During the passage of the active region (AR) across the solar disk, its spots and background fields showed complex motion trajectories, and numerous small-scale short-lived local polarity inversion lines (LPILs) were formed when new magnetic fluxes appeared in the AR and came closer to fields of opposite polarity. The length of LPILs was less than 15,000 km (~20 arcsec); their lifetime was several hours. Study of the flare activity of NOAA 12673 has shown that low-power flares (optical class S, area <2 sq. degrees) generally occur near LPILs. Before small flares and the September 06, 2017 large flare (optical importance 3B, X-ray class X9.3), in limited sites of local and main polarity inversion lines there were shear stresses and an increase in the magnetic field gradient: in the region of low-power flares, to 1.3–1.5 G/km; in the region of the large flare, 3–3.5 G/km. The results obtained suggest that the longitudinal magnetic field behaves similarly before both small and large flares.

Keywords: flares, magnetic fields, polarity inversion lines.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из фундаментальных вопросов солнечно-земной физики является вопрос о механизмах накопления энергии солнечными вспышками. Считается, что источником является свободная энергия магнитного поля, избыточная по отношению к энергии потенциального поля солнечных пятен и фоновых магнитных полей. К накоплению свободной энергии на Солнце в активных областях (АО) приводят вращения пятен, вихревые и сдвиговые течения солнечной плазмы (magnetic field shear) [Nagyard et al., 1984], в спокойных областях — вращения факельных площадок [Sundara et al., 1997; Cao et al.,

1983]. Существует множество теоретических схем, объясняющих природу солнечных вспышек и отдельные вспышечные явления. Предполагается, что высвобождение накопленной магнитным полем энергии происходит при вторжении нового магнитного потока из-под фотосферы в корональные магнитные поля АО [Krivsky, 1968]. В месте контакта всплывающего потока противоположной полярности со старыми магнитными полями образуются токовые слои. Со временем из-за ряда неустойчивостей происходит разрыв токовых систем, сопровождающийся быстрым пересоединением магнитных силовых линий и высвобождением свободной энергии магнитного поля в виде вспышки. Утверждается, что

тип вспышки определяется магнитным окружением, в которое внедряется поток [Heuvaerts et al., 1977]. Если новый поток всплывает около волокна АО вблизи линии раздела полярностей (ЛРП), это приводит к образованию двухленточной вспышки оптического класса ≥ 2 с энергией 10^{32} – 10^{33} эрг. Согласно доминирующей в настоящее время модели CSHKP, объединяющей разные наблюдательные и теоретические схемы, при вторжении потока волокно (плазмид) становится неустойчивым при искривлении силовых линий и выбрасывается вверх. Это приводит к сжатию окружающей ЛРП солнечной плазмы и образованию токового слоя с последующим пересоединением магнитных силовых линий и высвобождением свободной энергии в обширной области вышележащего магнитного поля [McKenzie, 2002]. Существуют три главные формы выделения энергии: гидродинамические движения (разрыв токового слоя, сопровождаемый быстрыми движениями плазмы), тепловой нагрев (мощные потоки тепла) в области разрыва токового слоя и поток большого количества (до 10^{38}) высокоэнергичных электронов и ионов с энергией от 20 кэВ до нескольких десятков МэВ. За счет теплопроводности и свободно распространяющихся вдоль магнитных петель нетепловых частиц энергия распространяется в хромосферу [Houng et al., 1981], разогревает до десятков миллионов градусов хромосферную плазму, вызывает ее испарение и приводит к образованию двойных источников жесткого рентгеновского излучения и вспышечных лент в линии H α . Следует сказать, что в действительности вспышки на Солнце не столь симметричны, как в модельных схемах, и существует множество наблюдательных фактов, которые не укладываются в рамки моделей. В этой связи исследование и анализ вспышечных событий продолжают оставаться актуальными.

Крупные мощные вспышки происходят обычно в максимуме и на фазе спада солнечной активности с частотой несколько вспышек в год. Такие вспышки порождают в атмосфере Солнца сложную цепочку динамических процессов, оказывают влияние на радиационную обстановку в ближнем космосе, магнитосферу, ионосферу и нейтральную атмосферу Земли, воздействуют на работу космических аппаратов, систем связи и навигации. Поэтому во все времена мощные вспышки вызвали повышенный интерес у исследователей. И хотя механизмы их генерации еще не до конца изучены, в настоящее время существует довольно полное представление о таких вспышках [Svestka, 1976; Алтынцев и др., 1982].

Вместе с тем на Солнце как в активных, так и в спокойных областях происходит множество вспышек малой мощности. К малым вспышкам (МВ) мы относим вспышки в линии H α с площадью < 2 кв. град и энергией $\sim 10^{29}$ эрг. В отдельные периоды частота их появления может увеличиваться до 1 вспышки в 5 мин. В это время сложно отличить МВ от «кипения» флоккула. Поэтому многие МВ относят к фоновым событиям и не регистрируют. По этой или другим причинам до настоящего времени не проводилось системного комплексного исследования МВ. Считается, что малые вспышки представляют собой

структуру типа простой петли. В мягком рентгене они имеют короткие временные масштабы, небольшие объемы, низкие высоты, большие плотности энергии. Энергия обычно выделяется в импульсной фазе. Характерен один всплеск жесткого рентгеновского излучения продолжительностью около одной минуты. В работах [Heuvaerts et al., 1977; Прист, 1985] утверждается, что МВ возникают при всплытии нового магнитного потока вблизи униполярных пятен у края АО или в районе ее униполярных полей. Взаимодействие потока с вышележащим магнитным полем формирует токовый слой, в турбулентной плазме которого происходит быстрое пересоединение магнитных полей, сопровождающееся выбросами вещества (серджами) и потоком частиц, которые в нижней части хромосферы вызывают МВ в H α . В 80-е гг. их исследования фактически прекратились. С началом полетов космических аппаратов основное внимание стало уделяться теории нагрева солнечной короны нановспышками [Parker, 1988]. Вместе с тем результаты ранних работ, посвященных МВ, указывали, что, существенно отличаясь в линии H α по мощности и площади, они могут проявлять схожие с крупными вспышками сценарии развития [Алтынцев и др., 1982]. В подтверждение этому в работе [Borovik, Zhdanov, 2018] на большом статистическом материале (более 80 тыс. вспышек) было установлено, что с точки зрения особенностей развития МВ не отличаются от крупных вспышек: сопровождаются активизациями и исчезновением волокон, возникают вблизи ЛРП, имеют взрывную фазу и многократные всплески интенсивности. Среди них встречаются вспышки, покрывающие тени солнечных пятен, двухленточные и белые вспышки. В работе [Borovik et al., 2020] по данным 21–24-го солнечных циклов было также показано, что МВ группируются в областях интенсивного выхода магнитных потоков главным образом в хвостовых и центральных частях групп солнечных пятен. Как и крупные мощные вспышки, МВ могут сопровождаться потоками протонов и рентгеновским излучением разной мощности, в том числе класса X [Borovik, Zhdanov, 2020]. Эти факты свидетельствуют о том, что природа и механизмы возникновения МВ являются важной задачей исследования, цель которого — понять развитие вспышечного процесса в относительно простом его проявлении и прояснить вопрос, лежит ли в основе вспышек разной мощности единый физический механизм или эти вспышки различаются по своей природе.

В последние десятилетия с помощью космических аппаратов стали возможными наблюдения солнечной атмосферы с высоким пространственным и временным разрешением. Это позволило провести исследование малых вспышек на более высоком качественном уровне. В настоящей работе приводятся результаты исследования вспышечной активности группы солнечных пятен NOAA 12673 по наблюдательным данным Solar Dynamics Observatory (SDO) (рис. 1). Активная область отличалась сложной структурой и высокой динамикой магнитных полей [Yang et al., 2017; Verma, 2018; Romano et al., 2019]. За время

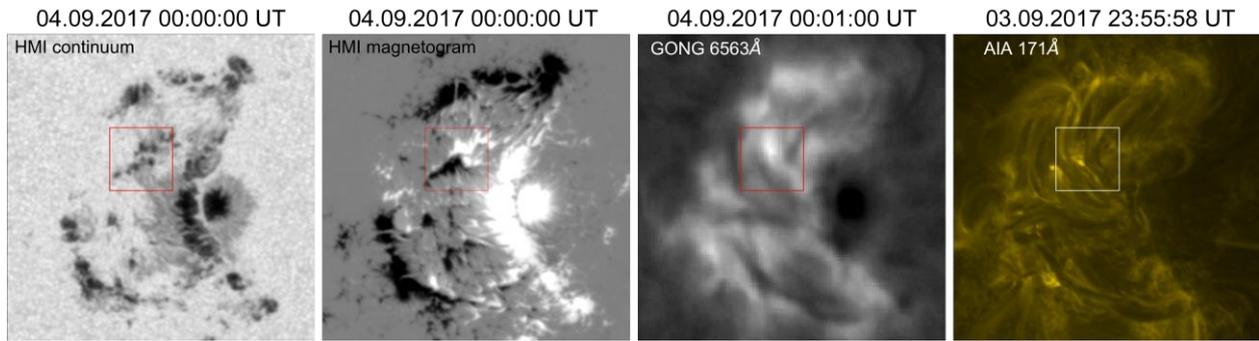


Рис. 1. Активная область NOAA 12673 по наблюдениям в континууме (SDO/HMI), линии $H\alpha$ (GONG) и линии 171 Å (SDO/AIA). Приведена HMI-магнитограмма АО. Квадратом 25×25 пкс выделена область одной из МВ

прохождения по диску Солнца в АО наблюдалось массовое появление арочных волоконных систем (arc filament system, AFS), крупные волокна отсутствовали. В сентябре 2017 г. она дала серию мощных вспышек и крупнейшую за последнее десятилетие вспышку рентгеновского класса X9.3.

1. ДАННЫЕ

Использовались наблюдения SDO/HMI и AIA [<http://jsoc.stanford.edu>]. Динамика продольного магнитного поля в АО исследовалась по HMI-магнитограммам полного диска Солнца (угловое разрешение $0.5''$ пкс $^{-1}$, частота кадров 45 с $^{-1}$). Фотосфера анализировалась по изображениям HMI-континуума. Для идентификации вспышек в солнечной короне использовались изображения Солнца SDO/AIA в линии 171 Å, для исследования в $H\alpha$ — наблюдения телескопов GONG [<https://gong.nso.edu>].

2. РЕЗУЛЬТАТЫ

2.1. Динамика магнитных полей в активной области NOAA 12673

За время прохождения АО по диску Солнца ее пятна и магнитные поля разного масштаба вращались и неравномерно перемещались по сложным траекториям (рис. 2). На панели *a* показаны движения мелкомасштабных полей и пятен 3 сентября 2017 г. Фоновые поля >80 Гс показаны цветом соответствующей полярности. Крупные стрелки — траектории движения пятен (контуры очерчены штриховой линией), маленькие — мелкомасштабных полей. Штриховой линией отмечены ЛРП I и II. Желтые стрелки — положения трех малых вспышек f1, f2 и f3 (раздел 2.2).

Средние скорости перемещения солнечных пятен составляли 0.1 – 0.5 км/с, что сопоставимо со скоростью горизонтальных течений плазмы в конвективных ячейках (0.3 – 0.5 км/с). С появлением в АО мелкомасштабных разнополярных потоков (1-6, 7-9) они с неравномерной скоростью от 0.1 до 0.7 км/с двигались к крупномасштабным фоновым полям той же полярности вплоть до полного слияния с ними. В отдельных случаях средние скорости составляли 1 – 2.4 км/с. Наблюдалось также объединение движущихся мелкомасштабных потоков (см. рис. 2). Области, образовавшиеся в результате слияния униполярных мелкомасштабных полей, выделены сплошной линией.

По мере перемещения мелкомасштабных полей их площадь и максимальная напряженность со временем возрастали. Скорости изменений составляли $(2.2 \div 5.3) \cdot 10^6$ км 2 /ч и 260 – 550 Гс/ч соответственно (панель *b*). При этом коэффициенты корреляции r между H_{\max} и S были высокие (~ 0.9 и выше).

Такое поведение всплывающих магнитных потоков напоминает модель Пиддингтона [Piddington, 1975], которая предполагает, что в подфотосферном слое тороидальное поле представляет собой дерево, стволом которого является основной магнитный жгут, а верхние ветви — слабые крупномасштабные поля и униполярные магнитные области. Выходя в солнечную атмосферу, магнитный жгут постепенно раскручивается и выпрямляется. В результате на поверхность фотосферы всплывают ветви дерева — мелкомасштабные магнитные структуры.

2.2. Локальные линии раздела полярности продольного магнитного поля

Движения крупномасштабных и всплывающих мелкомасштабных магнитных полей и их сближение с полями противоположной полярности приводили к образованию в активной области многочисленных локальных короткоживущих мелкомасштабных ЛРП (ЛЛРП) (рис. 2, 3). Для лучшей наглядности магнитограммы SDO/HMI показаны цветом соответствующей полярности: красный — S, синий — N.

Время существования ЛЛРП составляло несколько часов, протяженность — менее 15000 км (20 угл. сек). Для сравнения: главная ЛРП АО (см. рис. 15) формировалась перед крупными вспышками 6 сентября 2017 г. в течение двух суток и существовала до полного распада четверо суток. Ее протяженность составила ~ 60000 км (~ 80 угл. сек), т. е. ЛЛРП более чем в четыре раза короче ЛРП, а их время существования меньше в десятки раз.

2.3. Солнечные вспышки

Активная область NOAA 12673 отличалась высокой вспышечной активностью. Помимо трех мощных вспышек класса X в АО было зарегистрировано 84 МВ, в том числе 3 сентября — 11, 6 сентября — 8 (рис. 4). На панели *a* разным цветом выделены серии МВ (t — продолжительность вспышек). В увеличенном масштабе показана временная последовательность МВ перед двумя мощными вспышками. На панели *b*

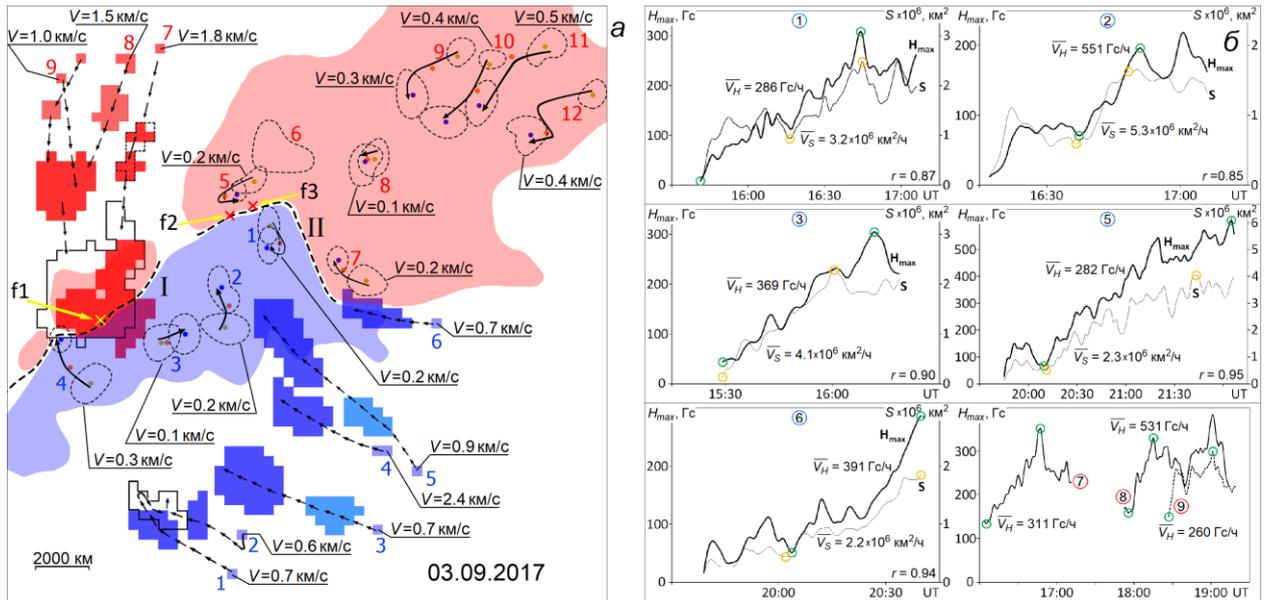


Рис. 2. Динамика магнитных полей NOAA 12673. Стрелки показывают движения мелкомасштабных магнитных потоков (1-6 и 7-9) и солнечных пятен (1-4 и 5-12) (а); изменение площади и максимальной напряженности мелкомасштабных магнитных потоков (б)

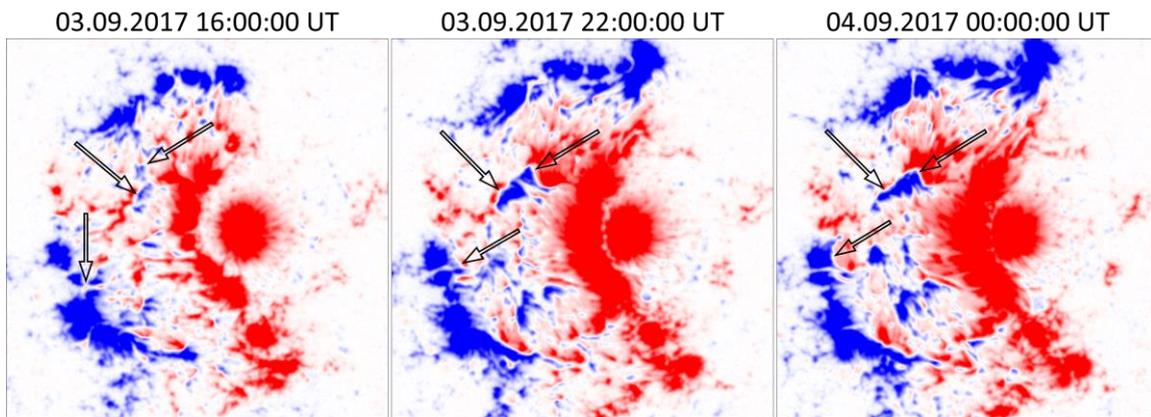


Рис. 3. Локальные линии раздела полярности продольного магнитного поля АО NOAA 12673 (S10W03). Синий и красный цвета — поля N и S полярностей. Стрелками показаны три области формирования ЛЛРП

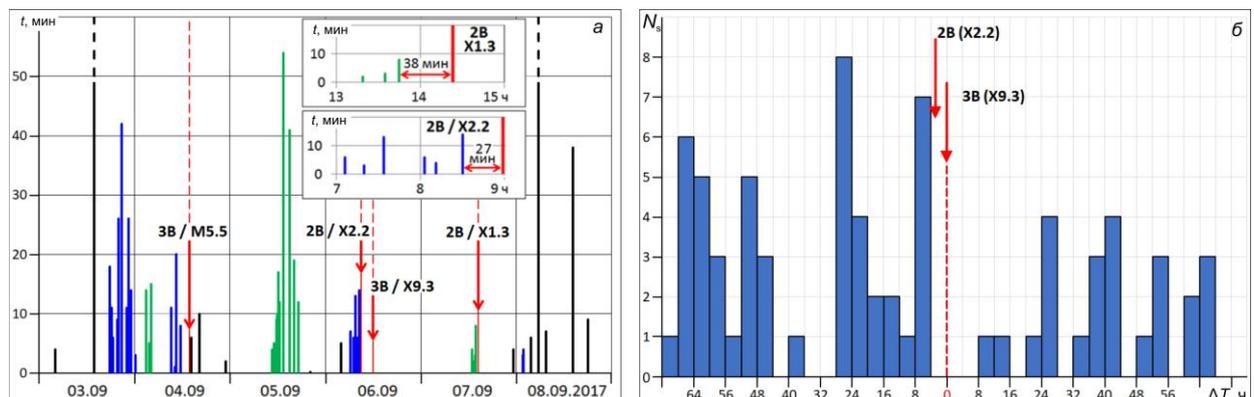


Рис. 4. Вспышечная активность NOAA 12673 (3–8 сентября 2017 г.)

с шагом 4 ч показана гистограмма распределения числа МВ относительно начала вспышки класса X9.3 (06.09.2017, 11:54 UT).

Следует заметить, что перед крупными мощными вспышками число МВ снижается. Это подтверждает

выводы работы [Боровик, 2023] об отсутствии или слабой активности МВ перед крупными вспышками.

Было изучено в общей сложности девять МВ и одна мощная двухленточная вспышка 06.09.2017 (оптический балл 3В, рентгеновский класс X9.3).

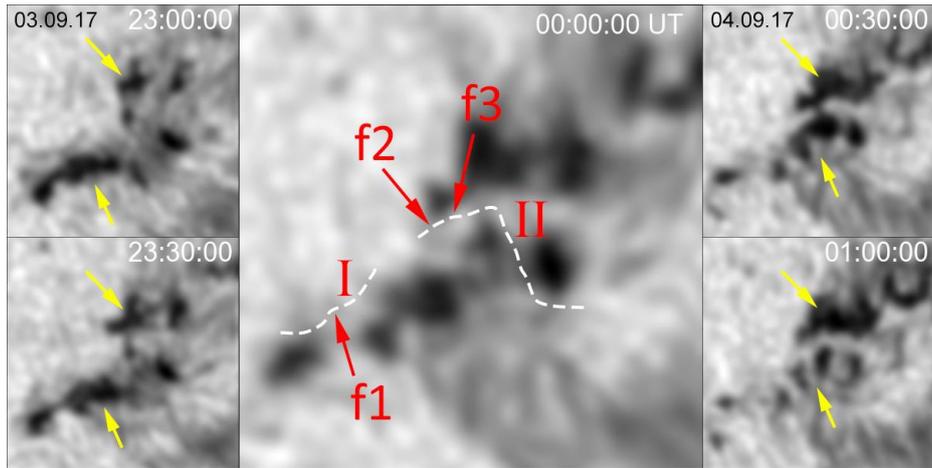


Рис. 5. Активность солнечных пятен вблизи ЛЛРП I и II до и после МВ

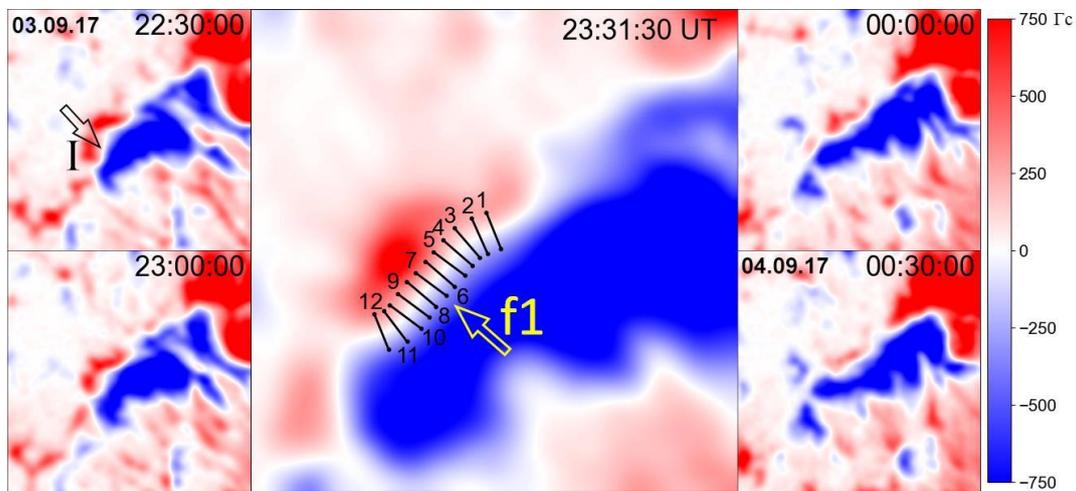


Рис. 6. Изменение структуры магнитного поля 3–4 сентября 2017 г. в области МВ f1

2.3.1. Вспышки малой мощности

Вспышки малой мощности возникали вблизи ЛЛРП во время движений, слияния и увеличения площади солнечных пятен (рис. 5, желтые стрелки). Отмечалось также их деление на фрагменты. Связь МВ с ЛЛРП была установлена также для трех МВ в АО NOAA 12674 (N14E13), развивающейся севернее NOAA 12673. О присутствии в АО побочных ЛРП (помимо основной), упоминается в монографии [Алтынцев и др., 1982]. Их существование подтверждено в работе [Боровик, 1994], в которой показана связь с побочными ЛРП центров вспышечной активности МВ.

Вспышка малой мощности 03.09.2017 (f1)

Вспышка возникла в 23:31:30 UT вблизи ЛЛРП I (см. рис. 5, на рис. 6 показана черной стрелкой) и имела продолжительность ~ 3 мин. На рис. 6 (и далее на рис. 10, 13, 15) показаны изменения структуры магнитного поля в области вспышки. На цветовой шкале приведены градации напряженности магнитного поля до 750 Гс.

Движения магнитных полей вблизи ЛЛРП приводили к ее смещению, деформации и вращению вокруг определенного центра (на рис. 7, а показан стрелкой). Скорости смещения ЛЛРП на разных

участках были различными, сопоставимыми в отдельных случаях со скоростью горизонтальных течений плазмы в конвективных ячейках.

Проанализированы изменения напряженности и градиента магнитного поля вдоль ЛЛРП. Для этого на момент начала вспышки ЛЛРП была разделена на участки перпендикулярными отрезками 2 угл. сек с шагом 1 пкс (см. рис. 6). Затем отрезки были перенесены на последующие и предыдущие магнитограммы и на концах определены напряженности и градиенты поля. Была обработана 161 магнитограмма. Исследование ограничивалось двухчасовым интервалом — час до и час после вспышки. Графики изменения H и $\text{grad}H$, сглаженные фильтром Савицкого—Голея, показаны на рис. 8, 9.

В области вспышки f1 на участках 7–12 обнаружен рост $\text{grad}H$ (см. рис. 8). Максимального значения 1.25 Гс/км он достиг на момент начала вспышки. Затем последовал спад. На других участках ЛЛРП (1–6) рост $\text{grad}H$ был слабым, снижался или полностью отсутствовал (см. рис. 9).

Вспышки малой мощности 04.09.2017 (f2, f3)

Вспышки возникли вблизи ЛЛРП II (см. рис. 5, 10): f2 — в 00:00:10 UT, продолжительность ~ 6 мин, f3 — недалеко от f2 в 00:36:10 UT, ~ 8 мин. Аналогично

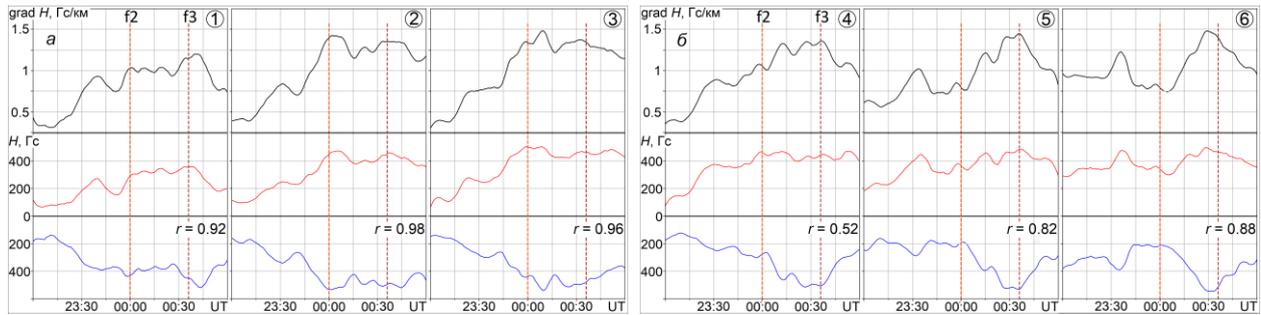


Рис. 11. Изменения H и $\text{grad}H$ в области МВ f2 (а) и f3 (б)

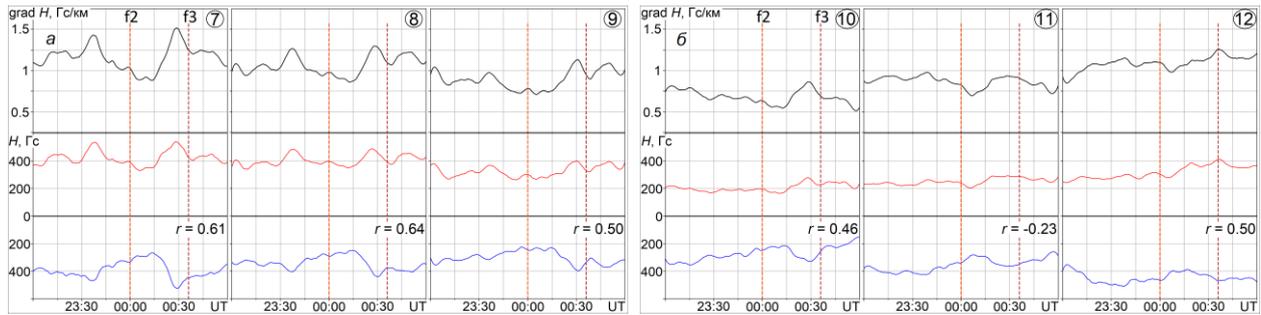


Рис. 12. Изменение H и $\text{grad}H$ вдоль ЛЛРП на участках 7–12 перед вспышками f2 и f3

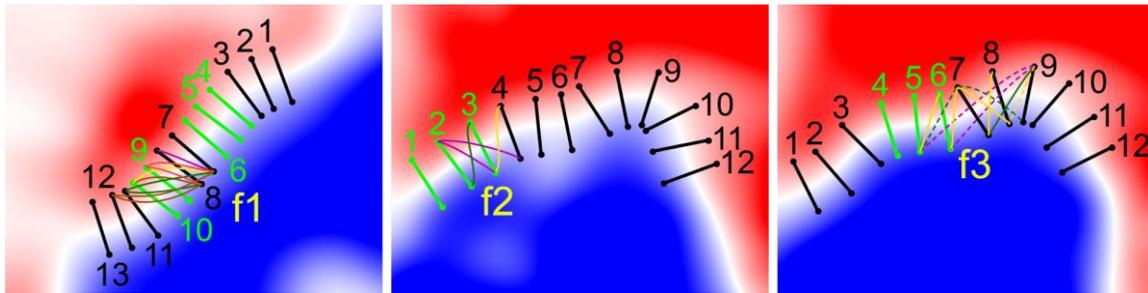


Рис. 13. Корреляционные связи между магнитными полями противоположной полярности в области МВ. Прямые связи показаны зеленым цветом. Для f1 и f3 коэффициенты корреляции составляют 0.9 и выше, для f2 — 0.8–0.85 (штриховая линия), 0.85–0.9 (сплошная)

вспышке f1 предвспышечные изменения магнитного поля перед f2 привели к смещению, деформации и вращению ЛЛРП вокруг определенного центра (см. рис. 7, б).

Было обнаружено, что на участках 1–4 в области f2, как и перед f1, наблюдался рост $\text{grad}H$ (рис. 11, а). Максимального градиента 1.34 Гс/км поле достигло также на момент начала вспышки. На других участках $\text{grad}H$ существенно не менялся (см. рис. 12, а).

Вспышка f3 произошла через 36 мин после f2 на той же ЛЛРП в 00:36:10 UT (см. рис. 5, 10). Аналогично f1 и f2 изменения $\text{grad}H$ за час до вспышки (см. рис. 11, б) показывают рост на участках 4–6. Максимальный градиент составил 1.46 Гс/км. На других участках таких изменений не наблюдалось (см. рис. 12).

В областях трех вспышек между полями противоположной полярности были обнаружены высокие (0.9 и выше) прямые и перекрестные корреляционные связи (см. рис. 8, 9, 11, 12, 13). Это свидетельствовало о существовании связанных биполярных структур магнитного поля по противоположные стороны от ЛЛРП и присутствию сдвиговых напряжений магнитных полей.

Из полученных результатов следует, что рост $\text{grad}H$ до 1.3–1.5 Гс/км на ограниченных участках ЛЛРП за 40–90 мин до начала вспышек и присутствие в их области сдвиговых напряжений поля являются необходимым условием возникновения МВ.

2.3.2. Мощная солнечная вспышка 6 сентября 2017 г.

Для установления типичности явлений, обнаруженных во вспышках f1, f2 и f3, аналогичное исследование было проведено для крупной двухленточной вспышки, произошедшей в АО 6 сентября 2017 г. в 11:54 UT. В результате обнаружено, что вспышке X9.3, так же как и малым вспышкам, предшествовали движения крупномасштабных магнитных полей, смещение, деформация и вращение ЛРП вокруг определенного центра (см. рис. 14, 15). Обнаружено также, что за 103–47 мин до вспышки на участках 12–19 главной ЛРП наблюдался, как и перед МВ, рост $\text{grad}H$. К началу вспышки он достиг максимального значения 3–3.5 Гс/км (рис. 16). На других участках ЛРП такого явления не наблюдалось (рис. 17).

Между полями противоположной полярности на участках ЛРП 13–20 были обнаружены прямые

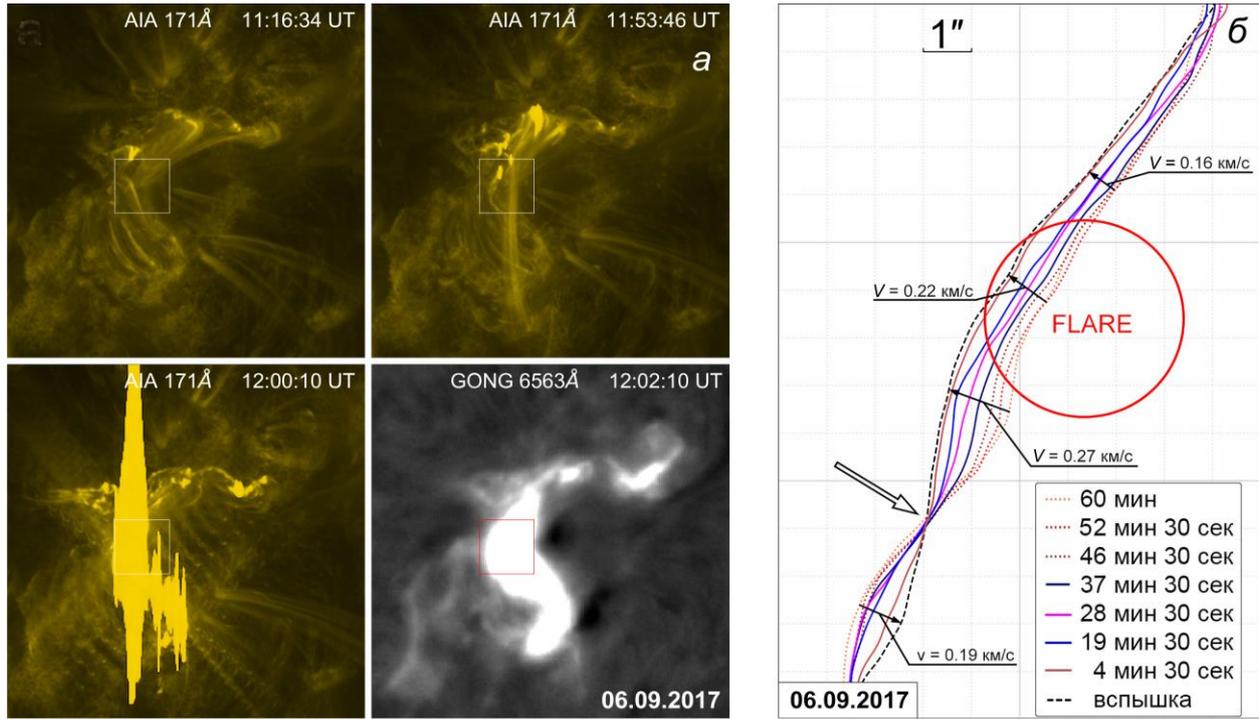


Рис. 14. Мощная вспышка 06.09.2017 (11:54 UT) в линиях 171 Å и H α (максимум развития) (а); движение ЛРП за час до вспышки (б). Красным кружком показана часть вспышки, наблюдавшаяся в линии H α отдельно

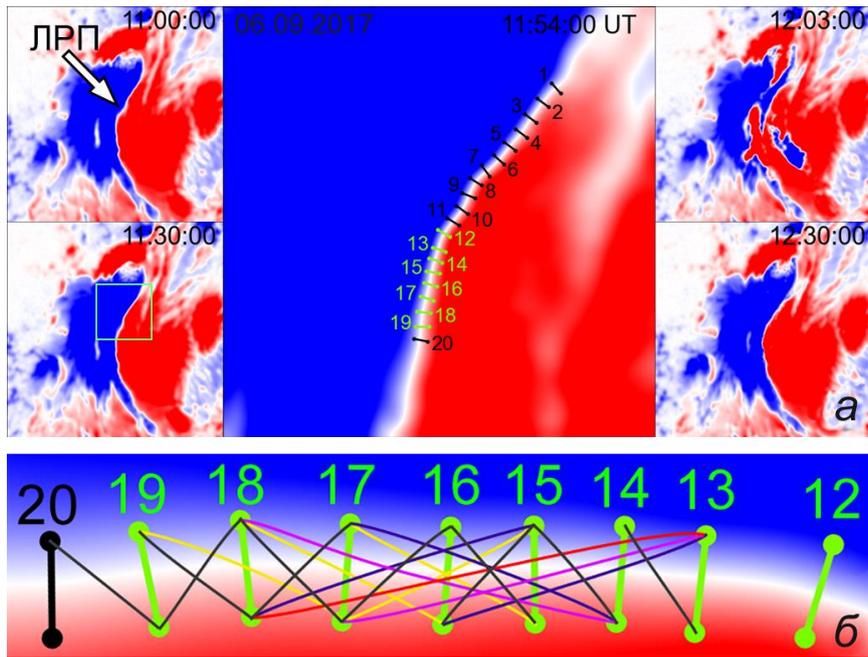


Рис. 15. Структура магнитного поля АО за час до и час после мощной вспышки (а); корреляционные связи в области мощной вспышки между магнитными полями противоположной полярности ($r=0.9$ и выше): прямые (зеленый цвет) и перекрестные (б)

и перекрестные корреляционные связи (см. рис. 15, б). В отдельных случаях коэффициент корреляции приближался к 1 (см. рис. 16), что свидетельствовало о присутствии сдвиговых напряжений магнитного поля в области вспышки.

Обращает на себя внимание тот факт, что все рассмотренные вспышки за несколько минут до их начала были идентифицированы в короне Солнца в виде ярких петель и узлов (см. рис. 1, 14). В линии 171 Å мик-

ровспышки происходят и в отсутствие H α -вспышек. Можно предположить, что в таких случаях энергии частиц, ускоренных в корональном источнике, было не достаточно, чтобы вызвать полноценную хромосферную вспышку.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Все изученные вспышки малой мощности происходили во время хорошо выраженной динамики

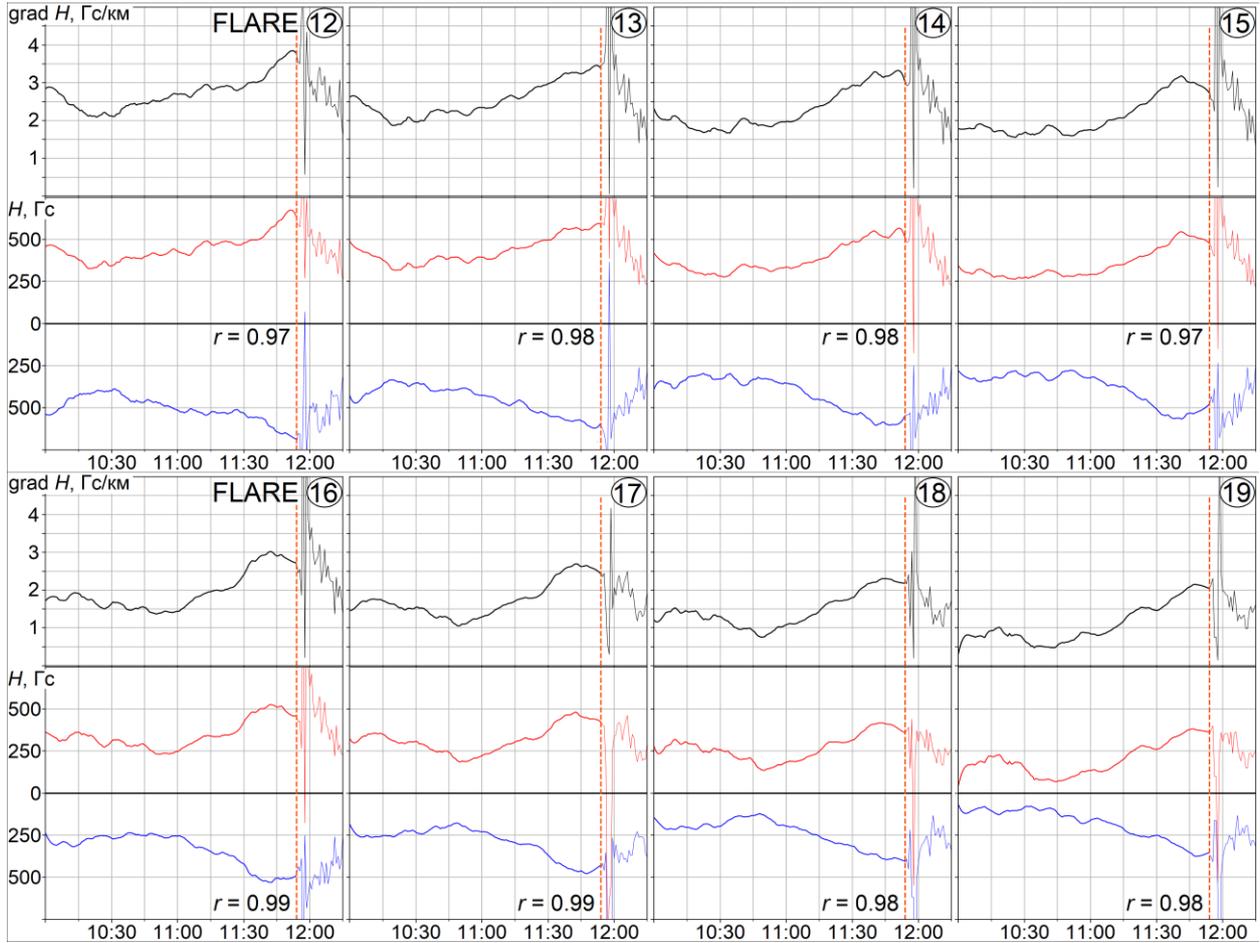


Рис. 16. Изменение градиента магнитного поля на участках 12–19 главной ЛРП перед мощной солнечной вспышкой

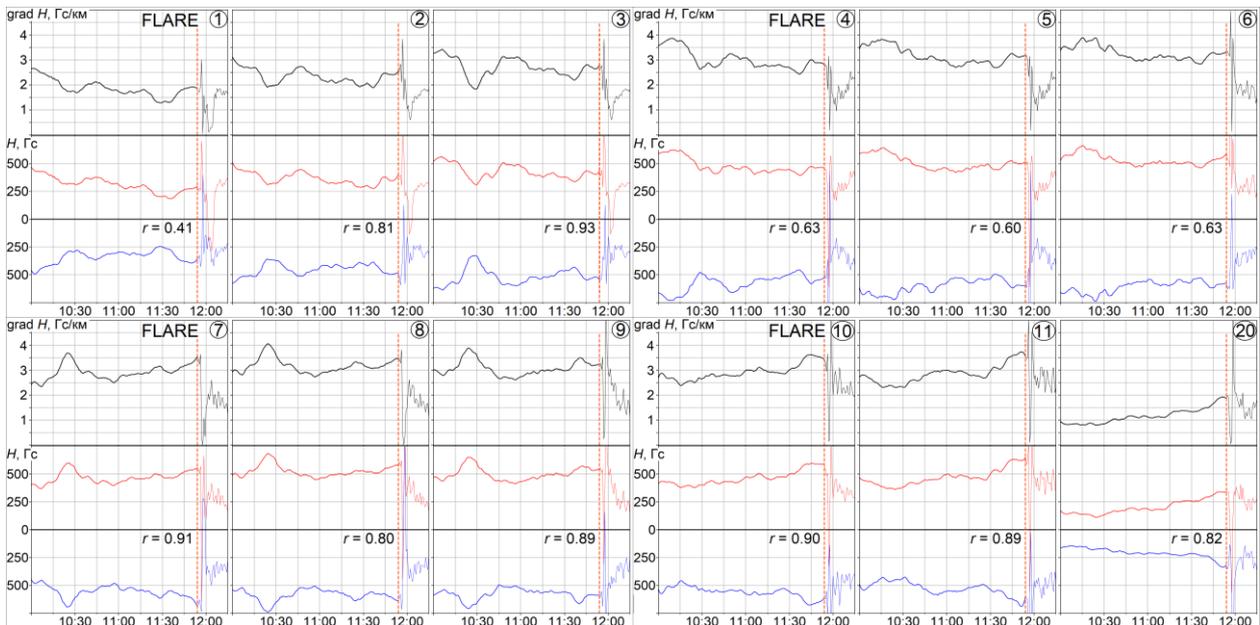


Рис. 17. Изменение градиента магнитного поля на участках главной ЛРП 1–11 и 20 перед мощной вспышкой 06.09.2017

мелкомасштабных магнитных структур активной области и крупномасштабных изменений поля.

2. Обнаружено, что МВ возникали вблизи мелкомасштабных короткоживущих ЛРП, формирую-

щихся в АО NOAA 12673 при вспышке новых мелкомасштабных магнитных потоков, их перемещении, слиянии и сближении с полями противоположных полярностей.

3. К возникновению МВ, вероятно, приводят рост градиента поля на отдельных участках ЛЛРП до значений 1.3–1.5 Гс/км и сдвиговые напряжения магнитного поля, возникающие в области вспышек. Согласно современным модельным представлениям сближение на ЛРП магнитных полей противоположных полярностей ведут к пересоединению магнитных полей и импульсному высвобождению свободной энергии в виде вспышки.

4. Анализ динамики магнитного поля перед вспышкой рентгеновского класса X9.3 показал, что аналогичные процессы происходят и перед крупными вспышками. При этом максимальный градиент поля на отдельном участке ЛРП составлял 3–3.5 Гс/км. Из полученных результатов следует, что механизмы возникновения солнечных вспышек разной площади и мощности принципиально могут не различаться.

Работа выполнена в рамках базового финансирования программы ФНИ П.16.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алтынцева А.Т., Банин В.Г., Куклин Г.В., Томозов В.М. *Солнечные вспышки*. М.: Наука, 1982. 246 с.
- Боровик А.В. Центры вспышечной активности групп солнечных пятен. *Исследования по геомагнетизму, аэронауки и физике Солнца*. 1994. Вып. 102. С. 133–152.
- Боровик А.В. Солнечные вспышки малой мощности в линии H α : результаты исследований. *Изв. КрАО*. 2023. Т. 119, № 1. С. 27–41.
- Прист Э. *Солнечная магнитная гидродинамика*. М.: Мир, 1985. 592 с.
- Borovik A.V., Zhdanov A.A. Distribution of low-power solar flares by brightness rise time. *Solar-Terr. Phys.* 2018. Vol. 4, no. 3. P. 3–12. DOI: [10.12737/stp-43201801](https://doi.org/10.12737/stp-43201801).
- Borovik A.V., Zhdanov A.A. Low-power solar flares of optical and X-ray wavelengths for solar cycles 21–24. *Solar-Terr. Phys.* 2020. Vol. 6, no. 3. P. 16–22. DOI: [10.12737/stp-63202002](https://doi.org/10.12737/stp-63202002).
- Borovik A.V., Mordvinov A.V., Golubeva E.M., Zhdanov A.A. Restructuring of the solar magnetic fields and flare activity centers in cycle 24. *Astronomy Rep.* 2020. Vol. 64, no. 6. P. 540–546. DOI: [10.31857/S0004629920070014](https://doi.org/10.31857/S0004629920070014).
- Cao T., Hu F., Xie G. Morphological properties of major spotless two-ribbon flare on 23 April 1981. *Scientia Sinica, Ser. A. Mathematical, Physical, Astronomical and Technical Sci.* 1983. Vol. 26. P. 972–977.
- Hagyard M.J., Moore R.L., Emslie A.G. The role of magnetic field shear in solar flares. *Adv. Space Res.* 1984. Vol. 4, no. 7. P. 71–80. DOI: [10.1016/0273-1177\(84\)90162-5](https://doi.org/10.1016/0273-1177(84)90162-5).
- Heyvaerts J., Priest E.R., Rust D.M. An emerging flux model for the solar flare phenomenon. *Astrophys. J.* 1977. Vol. 53, no. 1. P. 255–258. DOI: [10.1086/155453](https://doi.org/10.1086/155453).
- Hoyng P., Duijveman A., Machado M.E., et al. Origin and location of the hard X-ray emission in a two-ribbon flare. *Astrophys. J.* 1981. Vol. 246, no. 2. P. L155–L159. DOI: [10.1086/183574](https://doi.org/10.1086/183574).
- Krivsky L. Interaction of magnetic fields and the origin of proton flare. *Proc. IAU Symposium. Structure and Development of Solar Active Regions*. 1968. No. 35. P. 465–470.
- McKenzie D.E. Signatures of reconnection in eruptive flares. *Yohkoh 10th anniversary meeting, COSPAR Colloquia Ser.* 2002. Vol. 13. P. 155–164. DOI: [10.1016/S0964-2749\(02\)80041-5](https://doi.org/10.1016/S0964-2749(02)80041-5).
- Parker E.N. Nanoflares and the solar X-ray corona. *Astrophys. J.* 1988. Vol. 330. P. 474–479. DOI: [10.1086/166485](https://doi.org/10.1086/166485).
- Piddington J.H. Solar magnetic fields and convection. I. Active regions and sunspots. *Astrophys. Space Sci.* 1975. Vol. 34, no. 2. P. 347–362. DOI: [10.1007/BF00644803](https://doi.org/10.1007/BF00644803).
- Romano P., Elmhamdi A., Kordi A.S. Two strong white-light solar flares in AR NOAA 12673 as potential clues for stellar superflares. *Solar Phys.* 2019. Vol. 294, no. 4. P. 4–8. DOI: [10.48550/arXiv.1812.04581](https://doi.org/10.48550/arXiv.1812.04581).
- Sundara R.K., Selvendran R., Thiagarajan R. On the triggering of quiet region flares without filament activation. *Bull. Astr. Soc. India*. 1997. Vol. 25. P. 533–540.
- Svestka Z. *Solar flares*. Dordrecht: Reidel, 1976. 399 p.
- Verma M. The origin of two X-class flares in active region NOAA 12673. Shear flows and head-on collision of new and preexisting flux. *Astron. Astrophys.* 2018. Vol. 612, article number A101. P. 7. DOI: [10.1051/0004-6361/201732214](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201732214).
- Yang S., Zhang J., Zhu X., Song Q. Block-induced complex structures building the flare-productive solar active region 12673. *Astrophys. J. Lett.* 2017. Vol. 849, L21. P. 1–7. DOI: [10.3847/2041-8213/aa9476](https://doi.org/10.3847/2041-8213/aa9476).
URL: <http://jsoc.stanford.edu> (дата обращения 19 ноября 2023 г.).
URL: <https://gong.nso.edu> (дата обращения 19 ноября 2023 г.).

Как цитировать эту статью:

Боровик А.В., Жданов А.А. Динамика мелкомасштабных магнитных полей перед малыми и крупными солнечными вспышками. *Солнечно-земная физика*. 2023. Т. 9, № 4. С. 44–53. DOI: [10.12737/szf-94202305](https://doi.org/10.12737/szf-94202305).