

МАЛЫЕ СОЛНЕЧНЫЕ ВСПЫШКИ И ЛОКАЛЬНЫЕ ЛИНИИ РАЗДЕЛА ПОЛЯРНОСТИ ПРОДОЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ АКТИВНОЙ ОБЛАСТИ

SMALL SOLAR FLARES AND LOCAL POLARITY INVERSION LINES OF THE LONGITUDINAL MAGNETIC FIELD OF THE ACTIVE REGION

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, Kick.out@mail.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, Kick.out@mail.ru*

Аннотация. По фотосферным данным и данным о продольном магнитном поле со спутника SDO, а также по наблюдениям в линии H α на наземных станциях GONG исследована вспышечная активность группы солнечных пятен NOAA 12673, которая в сентябре 2017 г. произвела крупнейшую за последнее десятилетие вспышку класса X9.3. Активная область отличалась бурным развитием и сложными топологией и динамикой магнитного поля. Установлено, что в активной области на протяжении практически всего времени развития вследствие движений разнополярных магнитных потоков и их сближений происходило формирование многочисленных локальных линий раздела полярностей (ЛЛРП) магнитного поля. Обнаружено, что малые солнечные вспышки тесным образом связаны с ЛЛРП и возникают на тех участках ЛЛРП, где градиент продольного магнитного поля со временем достигает максимальных значений.

Ключевые слова: активные области, малые солнечные вспышки, структура продольного магнитного поля, линии раздела полярности (ЛРП).

Abstract. Using photospheric data and data on the longitudinal magnetic field from the SDO satellite, as well as observations in the H α line from GONG ground stations, we have studied the flare activity of the NOAA 12673 sunspot group, which in September 2017 produced the largest X9.3 class flare in the last decade. The active region was distinguished by rapid development, complex topology, and magnetic field dynamics. We have established that in the active region almost throughout the development period due to movements of diverse polar magnetic fluxes and their convergence, numerous local polarity inversion lines (LPIL) of the magnetic field were formed. Small solar flares have been found to be closely related to LPIL and to occur in those areas of LPIL where the gradient of the longitudinal magnetic field over time reaches maximum values.

Keywords: active regions, small solar flares, longitudinal magnetic field structure, polarity inversion lines (PIL).

ВВЕДЕНИЕ

Вопрос о механизмах накопления энергии и высвобождения ее в солнечных вспышках является одним из фундаментальных в солнечно-земной физике. Согласно статистике, на Солнце происходит ~1.5 % мощных вспышек с энергией $\approx 3 \cdot 10^{32}$ эрг [Боровик, Жданов, 2017]. Наиболее высокую вероятность появления таких вспышек показывают активные области с дельта-конфигурацией магнитного поля и интенсивным фотосферным магнитным потоком [Cui et al., 2006]. Самые мощные вспышки (класса X) предпочитают появляться в активных областях с сильными градиентами и сложной структурой магнитного поля. Данные многочисленных исследований свидетельствуют, что в процессе возникновения вспышки важную роль играет динамика подфотосферных магнитных полей, в результате которой в нижней короне и верхней хромосфере происходит накопление свободной магнитной энергии, избыточной по отношению к энергии потенциального поля солнечных пятен и фоновых магнитных

полей. Большую роль в накоплении энергии играют параллельные нейтральной линии сдвиговые течения, вращение пятен и факельных площадок [Hagyard et al., 1984a, b; Raman et al., 1993; Fletcher et al., 2011; Benz, 2017]. Предполагается, что вспышки возникают вследствие ряда неустойчивостей, возникающих в корональных магнитных полях в результате вторжения в активную область нового магнитного потока. В области контакта магнитных потоков противоположной направленности образуются токовые слои. Во время их разрыва и следующего за ним магнитного пересоединения избыточная энергия переходит в кинетическую энергию ускоренных частиц и тепловую энергию плазмы [Priest, 1992; Rust, Gauzzi, 1992; Somov, 1992]. Всплывающий поток в этом случае играет роль триггера, приводящего к высвобождению накопленной магнитным полем активной области свободной энергии.

Мощные вспышки — относительно редкие события на Солнце. Подавляющее большинство всех происходящих на Солнце вспышек (более 90 %) —

составляют вспышки малой мощности с энергией $\approx 10^{29}$ эрг [Боровик, Жданов, 2017]. Это свидетельствует о том, что условия для возникновения малых вспышек (МВ) в атмосфере Солнца формируются чаще всего. Обычно МВ относят к фоновым событиям, в редких случаях рассматривают как явления, сопутствующие крупным вспышкам. Вместе с тем, отличаясь от крупных вспышек по площади и мощности, МВ обладают рядом сходных с ними черт: возникают и развиваются вдоль линий раздела полярностей продольного магнитного поля, имеют взрывную фазу и многократные всплески интенсивности, сопровождаются активизациями и исчезновением волокон. Среди них встречаются вспышки, покрывающие тени солнечных пятен, двухленточные и белые вспышки. МВ сопровождаются радиовсплесками, рентгеновским излучением разной мощности (в том числе класса X), потоками протонов [Боровик, Жданов, 2019, 2020]. Энергия МВ обычно выделяется в импульсной фазе. Наиболее характерен один всплеск жесткого рентгеновского излучения продолжительностью около минуты. В мягком рентгене МВ характеризуются низкими высотами, небольшими объемами, большими плотностями энергии и короткими временными масштабами. Согласно современным представлениям, МВ относят к структуре типа простой петли. Предполагается, что МВ, как и крупные, возникают во время всплытия нового магнитного потока [Heyvaerts et al., 1977; Masuda et al., 1994]. В этом малые вспышки принципиально не отличаются от крупных вспышек и их исследование может прояснить вопрос — лежит ли в основе вспышек разной мощности единый физический процесс, или эти вспышки разные по своей природе.

В настоящее время наблюдения с космических аппаратов с высоким пространственным и временным разрешением позволяют обратиться к проблеме МВ на более высоком качественном уровне.

НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ

В данной работе представлены предварительные результаты исследования динамики магнитных полей в области малых солнечных вспышек. Была изучена вспышечная активность группы солнечных пятен NOAA 12673, которая в сентябре 2017 г. произвела крупнейшую за последнее десятилетие вспышку класса X9.3. Активная область отличалась бурным развитием, сложными топологией и динамикой магнитного поля [Yang et al., 2017; Verma, 2018; Romano et al., 2019]. Помимо четырех вспышек класса X в активной области наблюдалось множество МВ. Для их исследования мы использовали данные инструментов HMI и AIA Solar Dynamics Observatory (SDO) [<http://jsoc.stanford.edu>] и наблюдения в линии H α 6563 Å на телескопах Global Oscillation Network Group (GONG) [<https://gong.nso.edu>]. Для изучения динамики продольного магнитного поля использовали магнитограммы HMI с угловым разрешением 0.5" пиксель⁻¹ и частотой кадров 45 с. Фотоферные процессы анализировались по HMI-изобра-

жениям континуума полного диска Солнца. Для идентификации вспышек в ультрафиолете использовались данные AIA в линии 171 Å.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Анализ магнитограмм продольного поля показал, что на протяжении практически всего периода развития активной области в ней вследствие движений и сближений разнополярных магнитных потоков происходило формирование многочисленных локальных линий раздела полярности (ЛЛРП) (рис. 1).

Было изучено в общей сложности пять МВ в непосредственной близости от ЛЛРП, указанных на рис. 1 стрелками. Согласно Международной классификации оптических вспышек в линии H α [Смит, Смит, 1966; Алтынцев и др., 1982; Temmer et al., 2001], все исследуемые вспышки относились к классу S. Полученные результаты для всех МВ оказались аналогичны.

На рис. 2 представлена вспышка 4 сентября 2017 г. (00:00:10 UT). Область исследования МВ была ограничена площадкой 25×25 пикселей (зеленый квадрат на рис. 2) и двухчасовым интервалом: с 23:00 UT 03.09.17 по 01:00 04.09.17 — час до и час после вспышки. Все магнитограммы с высокой степенью точности были центрированы и преобразованы для двух интервалов напряженности: слабые поля до 50 Гс и поля свыше 50 Гс. Это позволяло отслеживать слабые изменения полей и всплытия новых магнитных потоков. Дополнительно для контроля над изменениями магнитных полей в выбранной площадке для каждого кадра были получены цифровые матрицы напряженности.

Анализ данных показал, что вспышка сопровождалась хорошо выраженными изменениями в структуре магнитного поля активной области (рис. 3). До вспышки это выражалось в сближении и слиянии пятен, увеличении их площади. После вспышки наблюдалось деление пятен на отдельные фрагменты (главным образом пятен северной полярности). Аналогичная картина прослеживалась по магнитограммам.

Были определены изменения напряженности и градиента магнитного поля в непосредственной близости от ЛЛРП до и после МВ. Для этого на магнитограмме в 00:00:00 UT был построен ряд перпендикулярных к ЛЛРП отрезков с шагом примерно один пиксель и длиной 1–3 пикселя. Затем положение ЛЛРП было перенесено на предыдущие и последующие кадры и для 161 магнитограммы были рассчитаны значения напряженностей на концах отрезков и градиенты магнитных полей. Полученные графики (рис. 4–6) были сглажены фильтром Савицкого—Голея.

Из рис. 4 следует, что на отрезках 1, 2 и 3, где, по наблюдениям в линии H α , возникла вспышка f1, за 45, 20 и 45 мин соответственно до ее начала происходил рост градиента магнитного поля. Максимальный градиент на участке 1–3 составил 1.34 Гс/км. После вспышки на отрезках 1 и 2 наблюдался спад grad H .

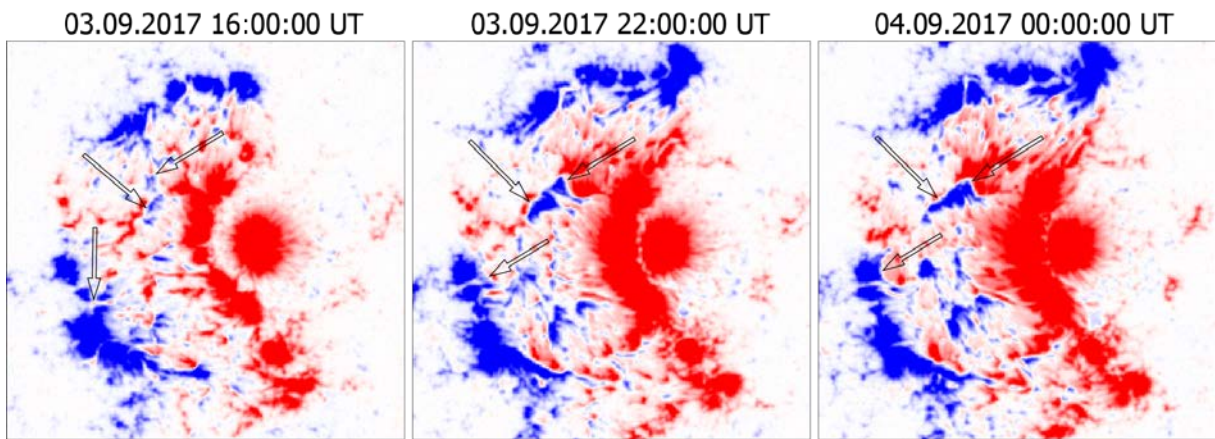


Рис. 1. Образование ЛЛРП в активной области NOAA 12673. На магнитограммах HMI/SDO синим и красным цветом выделены поля северной и южной полярности соответственно. Стрелками указаны три области формирования ЛЛРП

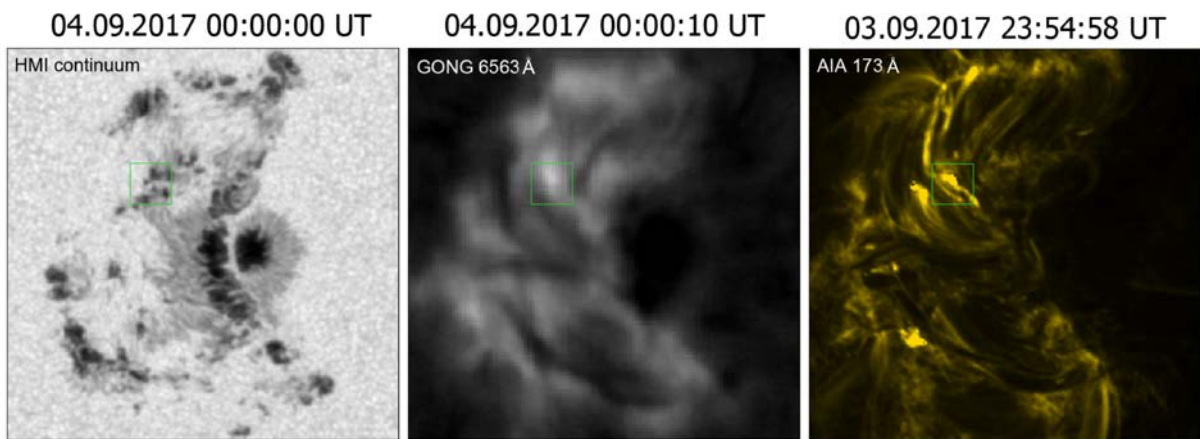


Рис. 2. Малая вспышка 4 сентября 2017 г. (00:00:10 UT) в активной области NOAA 12673

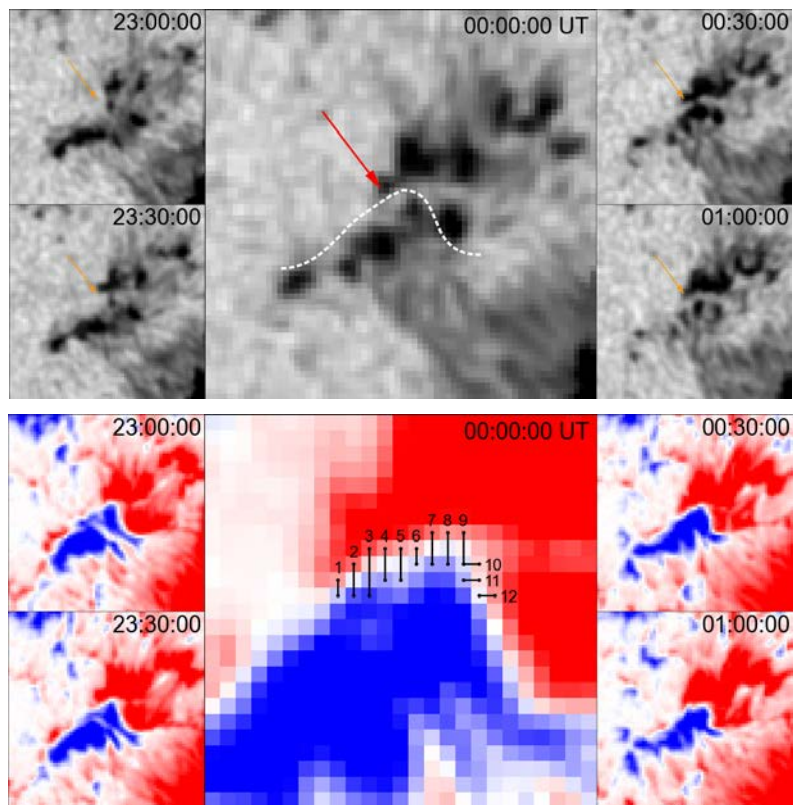


Рис. 3. Пятенная активность и изменения продольного магнитного поля в области MB в интервале двух часов

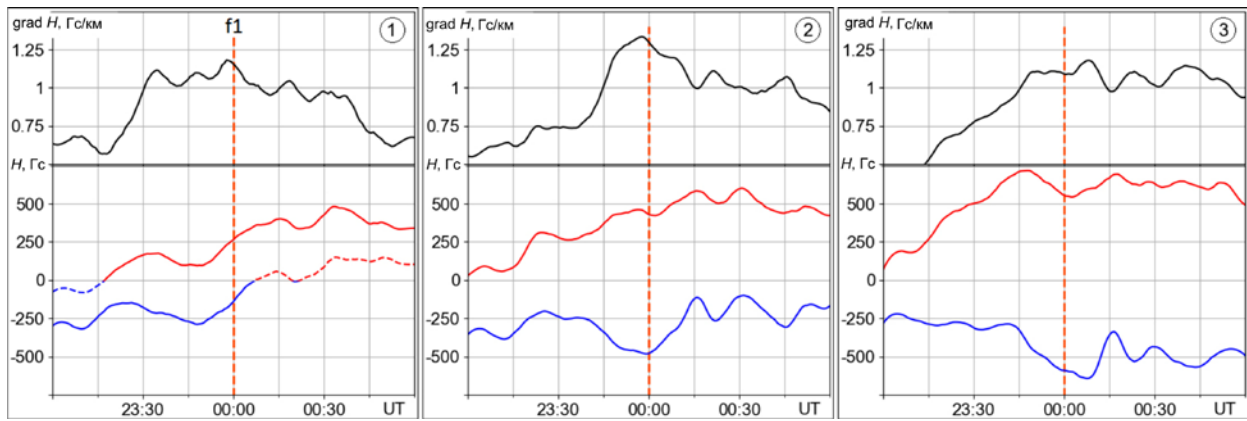


Рис. 4. Изменение градиента и напряженности магнитного поля вблизи ЛЛРП в области вспышки. Красным и синим цветом, так же как и на следующих рисунках, показаны изменения напряженности магнитного поля южной и северной полярности соответственно

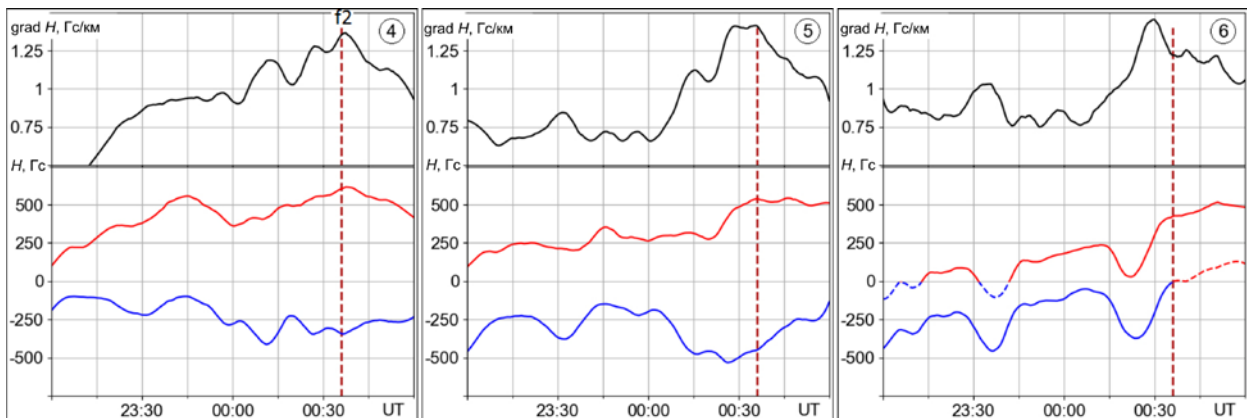


Рис. 5. Изменение градиента и напряженности магнитного поля вдоль ЛЛРП в области вспышки f2 (00:36:10) на участках 4–6

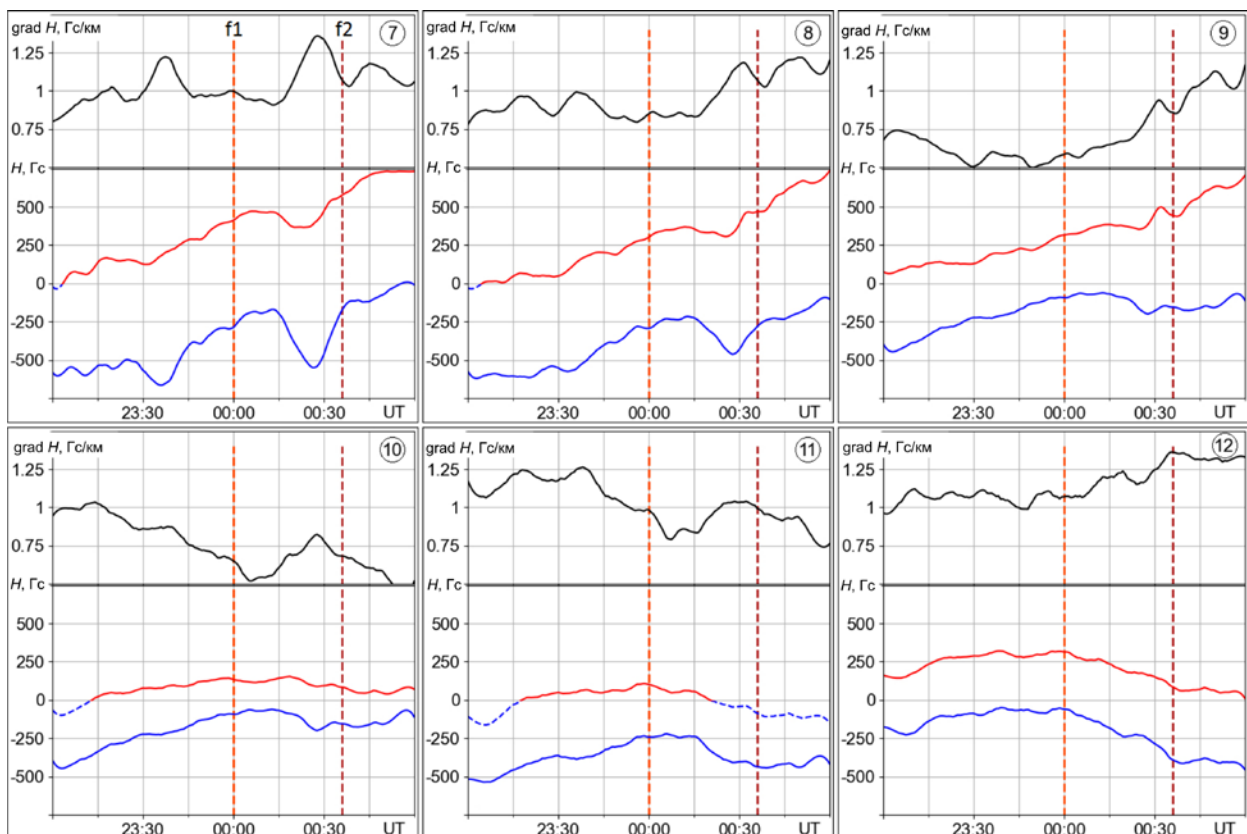


Рис. 6. Изменение напряженности и градиента магнитного поля вдоль ЛЛРП на участках 7–12

Примерно через 30 мин после первой вспышки на ЛЛРП на участках 4–6 в 00:36:10 произошла вторая МВ f2. Графики на рис. 5 показывают аналогичный рост $\text{grad } H$ перед вспышкой и следующий за ней спад. Максимальный градиент поля в этом случае составил 1.46 Гс/км. На рис. 6 приведены изменения градиента магнитного поля на участках 7–12, где в рассматриваемом временном интервале МВ не было.

На этих графиках характерная для вспышек картина фактически отсутствует, за исключением, может быть, кратковременного всплеска $\text{grad } H$ на отрезке 7 перед МВ f2.

Полученные результаты показывают также, что на отдельных участках ЛЛРП (1, 6–8, 10–12) между напряженностями полей разной полярности существовала сильная (>0.9) корреляционная зависимость. Обращает на себя внимание тот факт, что до и после вспышек на ЛЛРП наблюдалось замещение магнитных полей одной полярности другой (1, 6, 10, 11), что могло быть связано с «гашением» (cancellation) магнитных потоков противоположной полярности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предварительные результаты исследования динамики магнитных полей в области малых вспышек показали, что малые вспышки сопровождаются хорошо выраженными изменениями в структуре магнитного поля активной области. Вспышки происходят на локальных линиях раздела полярностей, возникающих в активной области в результате сближения разнополярных магнитных потоков. Одним из важных и, возможно, основных условий возникновения малых вспышек является рост градиента магнитного поля на отдельных участках ЛЛРП до некоторых максимальных значений (в нашем случае 1.3–1.5 Гс/км).

Работа выполнена в рамках государственного задания П.16 и поддержана грантом РФФИ 19-52-45002.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алтынецев А.Т., Банин В.Г., Куклин Г.В., Томозов В.М. *Солнечные вспышки*. М.: Наука, 1982. 246 с.
- Боровик А.В., Жданов А.А. Статистические исследования солнечных вспышек малой мощности. Распределения вспышек по площади, яркости и баллам. *Солнечно-земная физика*. 2017. Т. 3, № 1. С. 34–45. DOI: [10.12737/22486](https://doi.org/10.12737/22486).
- Боровик А.В., Жданов А.А. Процессы энерговыделения в солнечных вспышках малой мощности. *Солнечно-земная физика*. 2019. Т. 5, № 4. С. 3–11. DOI: [10.12737/szf-54201901](https://doi.org/10.12737/szf-54201901).
- Боровик А.В., Жданов А.А. Солнечные вспышки малой мощности в оптическом и рентгеновском диапазонах длин волн в 21–24-м солнечных циклах. *Солнечно-земная физика*. 2020. Т. 6, № 3. С. 18–25. DOI: [10.12737/szf-63202002](https://doi.org/10.12737/szf-63202002).
- Смит Г., Смит Э. *Солнечные вспышки*. М.: Мир, 1966. 426 с.
- Benz A.O. Flare Observations. *Solar Phys.* 2017. Vol. 14, no. 7. P. 1–59. DOI: [10.1007/s41116-016-0004-3](https://doi.org/10.1007/s41116-016-0004-3).

Cui Y., Li R., Zhang L., He Y., Wang H. Correlation between solar flare productivity and photospheric magnetic field properties. *Solar Phys.* 2006. Vol. 237, no. 1. P. 45–59. DOI: [10.1007/s11207-006-0077-6](https://doi.org/10.1007/s11207-006-0077-6).

Fletcher L., Dennis B.R., Hudson H.S., et al. An observational overview of solar flares. *Space Sci. Rev.* 2011. Vol. 159. P. 19–106.

Hagyard M.J., Moore R.L., Emslie A.G. The role of magnetic field shear in solar flares. *Adv. Space Res.* 1984a. 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).

Hagyard M.J., Smith J.B., Teuber D., West E.A. A quantitative study relating observed shear in photospheric magnetic fields to repeated flaring. *Solar Phys.* 1984b. Vol. 91, no. 1. P. 115–126. DOI: [10.1007/BF00213618](https://doi.org/10.1007/BF00213618).

Heyvaerts J., Priest E.R., Rust D.M. An emerging flux model for the solar flare phenomenon. *Solar Phys.* 1977. Vol. 53, no. 1. P. 255–258. DOI: [10.1086/155453](https://doi.org/10.1086/155453).

Masuda S., Kosugi T., Hara H., et al. A loop-top hard X-ray source in a compact solar flare as evidence for magnetic reconnection. *Nature*. 1994. Vol. 371. P. 495–497. DOI: [10.1038/371495a0](https://doi.org/10.1038/371495a0).

Priest E.R. Solar flare MHD processes. *Pub. Astron. Inst. Acad. Sci. Czech. Republic.* 1992. Vol. 88. P. 95–120.

Raman K.S., Gupta S.S., Selvendran R. Filament activity in a quiet region flare. *Astron. Astrophys.* 1993. Vol. 14, no. 1. P. 45–52. DOI: [10.1007/BF02702280](https://doi.org/10.1007/BF02702280).

Romano P., Elmhamdi A., Kordi A.S. Two strongwhite-light solar flares in AR NOAA 12673 as potential clues for stellar superflares. *Solar Phys.* 2019. Vol. 294, no. 4. 15 p. DOI: [10.1007/s11207-018-1388-0](https://doi.org/10.1007/s11207-018-1388-0).

Rust D.M., Gauzzi G. Variation of the Vector Magnetic Field in an Eruptive Flare. *Word Space Congr.: 43rd Congr. Int. Astronaut. Fed. (LAF) and 29th Plen. Meet. Comm. Space Res. (COSPAR)*. Washington, 1992. 486 p. DOI: [10.1007/3-540-55246-4_73](https://doi.org/10.1007/3-540-55246-4_73).

Somov B.V. *Physical Processes in Solar Flares*. Dordrecht; Boston: Kluwer Academic Publ., 1992. 249 p.

Temmer M., Veronig A., Hanslmeier A., Otruba W. Statistical analysis of solar Ha flares. *Astron. Astrophys.* 2001. Vol. 375. P. 1049–1061. DOI: [10.1051/0004-6361:20010908](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20010908).

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, A101. 7 p. DOI: [10.1051/0004-6361/201732214](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201732214).

Yang Shuhong, Zhang Jun, Zhu Xiaoshuai, Song Qiao. Block-induced complex structures building the flare-productive solar active region 12673. *Astrophys. J. Lett.* 2017. Vol. 849, L21. 7 p. DOI: [10.3847/2041-8213/aa9476](https://doi.org/10.3847/2041-8213/aa9476).

URL: <http://jsoc.stanford.edu> (дата обращения 10 октября 2021 г.).

URL: <https://gong.nso.edu> (дата обращения 10 октября 2021 г.).

Как цитировать эту статью:

Боровик А.В., Жданов А.А. Малые солнечные вспышки и локальные линии раздела полярности продольного магнитного поля активной области. *Солнечно-земная физика*. 2022. Т. 8, № 1. С. 19–23. DOI: [10.12737/szf-81202202](https://doi.org/10.12737/szf-81202202).