

Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 119, № 1, 27–41 (2023)

УДК 523.98

Солнечные вспышки малой мощности в линии H_{α} : результаты исследований

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

Поступила в редакцию 3 ноября 2022 г.

Аннотация. В работе обобщаются результаты многолетних исследований вспышек малой мощности в линии H_{α} (оптический класс S), полученные с использованием данных международного вспышечного патруля, наблюдательных материалов в линии 6563 \AA Байкальской астрофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН и телескопов GONG, наблюдений обсерваторий SDO, SOHO и Kitt Peak. В результате проведенных исследований получены уточненные, статистически достоверные и наиболее полные на сегодняшний день данные о пространственно-временных параметрах солнечных вспышек, оценена их полная энергия в оптическом диапазоне длин волн. Установлено, что вспышки малой мощности (малые вспышки) образуют на Солнце плотные скопления – центры вспышечной активности (ЦВА), связанные с областями всплывающих магнитных потоков. Обнаружено, что такие вспышки возникают вблизи локальных мелкомасштабных короткоживущих линий раздела полярности (ЛЛРП) продольного магнитного поля. Одной из выявленных закономерностей возникновения малых вспышек является возрастание градиента магнитного поля на отдельных участках ЛЛРП в области вспышки. Продолжительность роста составляет от 40 минут до 1.5 часов. Максимального градиента (1.3–1.5 Гс/км) магнитное поле достигает на момент возникновения вспышки.

Результаты исследования показывают, что вспышки малой мощности обладают схожими с крупными вспышками сценариями развития: сопровождаются активизациями и эрупцией волокон, имеют взрывную фазу, сопровождаются излучением разной мощности в рентгеновском и радиодиапазонах, потоками протонов. Среди них встречаются вспышки, покрывающие тени солнечных пятен, двухленточные и белые вспышки. Полученные результаты могут быть использованы для диагностики нестационарных процессов на Солнце, прогноза солнечной активности и геоэффективных солнечных событий.

Ключевые слова: солнечные вспышки, магнитные поля

1 Введение

Вспышки на Солнце представляют собой широкий ансамбль явлений, существенно отличающихся по площади, энергии и мощности. 1.5 % вспышек с энергией $\sim 10^{32}$ эрг относятся к мощным вспышкам (оптические классы 2–4): явления относительно редкие, но часто сопровождаемые геомагнитными возмущениями земной атмосферы. Хотя природа и механизмы мощных вспышек до конца еще не изучены, существует довольно полное представление о таких вспышках.

Самым многочисленным и еще слабо изученным классом вспышек на Солнце являются вспышки малой мощности с энергией $\sim 10^{29}$ эрг (оптический класс S). Обычно их относят к фоновым событиям, в редких случаях рассматривают как явления, сопутствующие крупным вспышкам. Основные результаты исследования вспышек малой мощности в линии H_{α} были получены еще в 80-е годы. После этого к теме вспышек малой мощности в линии H_{α} фактически никто больше не обращался.

С началом полетов космических аппаратов внимание астрофизиков привлекла теория нагрева короны Солнца, и больше внимания стало уделяться рентгеновским микровспышкам и нановспышкам – вспышкам с характерными размерами в несколько тысяч километров, по классификации GOES относящимся к классам В и А вплоть до предела чувствительности детекторов GOES. В

настоящее время природа и роль микровспышек и нановспышек еще далеки от прояснения и остаются отдельной важной темой исследования (Богачев и др., 2020).

В монографии Смит, Смит (1966) малые вспышки характеризуются как небольшие однородные яркие узлы, не связанные со структурой хромосферы. Их световые кривые отличаются от более крупных вспышек временным масштабом и яркостью. Продолжительность малых вспышек лежит в интервале от 6 до 10 минут. Средняя интенсивность составляет 46 % непрерывного спектра по данным обсерватории Sacramento Peak и 56 % по данным McMath-Hulbert. Корреляция между интенсивностью и площадью вспышек практически отсутствует. Малые вспышки, как и крупные, возникают вблизи линий раздела полярности продольной составляющей магнитного поля (Howard, Harvey, 1964). Вспышечные узлы не всегда соединяются между собой и не всегда образуют ленты. На лимбе малые вспышки появляются в виде ярких точек, которые быстро переходят в яркие холмы, приобретают конические и цилиндрические формы (Северный, Шапошникова, 1961; Howard, Harvey, 1964; Смит, Смит, 1966). Со временем они могут показывать расширение, пульсации, выбросы и петли.

В 70-е годы во время полета орбитальной станции Skylab (программа CINOF), совпавшего с периодом низкой солнечной активности, были получены новые данные о малых вспышках (Svestka, 1975). Обнаружено, что в активных областях вспышки малой мощности возникают сериями. Отдельные вспышки имеют петельную структуру, сопровождаются мягким рентгеновским и микроволновым излучением, радиовсплесками III типа. Узлы вспышек располагаются вблизи линий раздела полярностей на стыке соседних супергрануляционных ячеек.

По современным представлениям вспышки малой мощности относят к структурам типа простой петли. В мягком рентгене они характеризуются небольшими объемами, низкими высотами, большими плотностями энергии и короткими временными масштабами. Энергия такой вспышки обычно выделяется в импульсной фазе. Характерен один всплеск жесткого рентгеновского излучения продолжительностью около минуты. Считается, что малые вспышки, как и крупные, возникают в активной области во время всплытия нового магнитного потока, который, взаимодействуя с вышележащим полем, образует токовый слой. В результате в турбулентной плазме токового слоя происходит быстрая аннигиляция магнитного поля, сопровождаемая выбросом вещества и потоком частиц в нижнюю часть хромосферы, вызывая там оптическую вспышку (Heyvaerts et al., 1977; Прист, 1985).

Анализ результатов, полученных разными авторами, показывает, что отдельные вспышки малой мощности, отличаясь от крупных вспышек масштабами, появлением в условиях относительно простой конфигурации магнитного поля, групповым характером появления и др., обнаруживают ряд характерных для крупных вспышек особенностей. К ним относится связь с линиями раздела полярностей, петельная структура, усиление жесткой электромагнитной радиации, генерация радиовсплесков (Алтынцев и др., 1982). Это свидетельствует о том, что вспышки малой мощности могут принципиально не отличаться от крупных солнечных вспышек. И даже в том случае, если в слабой вспышке не наблюдаются определенные явления (например, континуум белого света), процесс может протекать аналогичным образом. Поэтому изучение закономерностей возникновения вспышек малой мощности на разных фазах развития активных областей, их пространственно-временное распределение по поверхности Солнца, геоэффективные проявления, а также физическая природа не только составляют важное направление фундаментальных исследований для понимания механизмов солнечных вспышек, но и могут дать возможность использовать результаты для прогноза солнечной активности.

Целью исследования было попытаться понять развитие вспышечного процесса в относительно простом его проявлении, а также прояснить вопрос – лежит ли в основе вспышек разной мощности единый физический механизм, или эти вспышки разные по своей природе.

2 Данные

В работе в краткой обобщающей форме приводятся основные результаты исследования вспышек малой мощности в линии H_{α} (оптический балл S), выполненного по наблюдениям Байкальской астрофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН, других наземных и космических обсерваторий. Исполь-

зовались данные международного вспышечного патруля¹, космических спутников серии GOES², наблюдательных материалов Байкальской астрофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН (БАО) и телескопов GONG³ в линии H_{α} (6563 Å), наблюдений космической обсерватории Solar Dynamics Observatory (SDO) с инструментов HMI и AIA⁴.

Для изучения динамики магнитных полей во время вспышек использовались фотосферные данные (SDO/HMI – изображения полного диска Солнца в континууме), магнитограммы SDO/HMI с угловым разрешением $0.5'' \cdot \text{пиксель}^{-1}$ ($\sim 350 \text{ км} \cdot \text{пиксель}^{-1}$) и данные о магнитных полях обсерваторий Kitt Peak⁵ и SOHO/MDI⁶. Для идентификации вспышек в переходной области солнечной атмосферы использовались изображения SDO/AIA в линии 171 Å.

3 Статистические исследования

Важную информацию о динамике и энергетике вспышечных процессов несут в себе пространственно-временные характеристики вспышек. Такие исследования были выполнены еще в период становления международного вспышечного патруля (1957–1958 гг.). Но, как показал анализ результатов (Смит, Смит, 1966; Svestka, 1975; Алтынцев и др., 1982; Borovik, Zhdanov, 2017a), данные были неоднородными, отягощены ошибками, статистика была невысокой (несколько сотен, в редких случаях несколько тысяч вспышек). С тех пор параметры солнечных вспышек не уточнялись. Поэтому имело смысл повторить исследование.

Были использованы данные международного вспышечного патруля за период 1972–2010 гг. (123801 вспышка). С помощью разработанных компьютерных программ в исходных каталогах были исправлены ошибки, исключено дублирование событий, учтены случаи, когда станции не сообщали класс яркости, класс площади, время начала, максимума, окончания вспышки и др.

В результате статистического исследования были получены наиболее полные на сегодняшний день и статистически достоверные данные о времени подъема яркости вспышек к максимуму, времени спада и продолжительности (Borovik, Zhdanov, 2017a, b, 2018a, b). Также установлено, что оптическое излучение 94.6% солнечных вспышек длится не более одного часа. “Сверхпродолжительные” вспышки ($t > 60$ минут) существуют в пределах 2–3 часов, а время жизни наиболее мощных вспышек составляет не более 8 часов. Вспышки малой мощности, в отличие от 6–10 минут по данным Смит, Смит (1966), продолжаются в среднем 20 минут. При этом размах распределения продолжительности малых вспышек довольно широкий и составляет ~ 6 часов, что сопоставимо с крупными вспышками.

У вспышек малой мощности впервые обнаружена высокая корреляционная зависимость между продолжительностью и временем подъема яркости к максимуму (Borovik, Zhdanov, 2019). На распределении относительной продолжительности подъема обнаружена последовательность максимумов, наиболее значимые из которых 0.2, 0.25, 0.33 и 0.5 (рис. 1). Аналогичную структуру распределения $T_{\text{отн}}$ показали также типы малых вспышек D, G и V (рис. 2). Надо сказать, что на распределениях по продолжительности и времени подъема яркости вспышек таких максимумов не наблюдается. Это может свидетельствовать о том, что в мелкомасштабных оптических вспышках выделение энергии происходит дискретным образом.

Получены также данные, показывающие, что вспышки малой мощности проявляют схожие с крупными вспышками сценарии развития: сопровождаются активизациями и эрупцией волокон, имеют взрывную фазу, многократные всплески интенсивности. Среди них встречаются вспышки, покрывающие тени солнечных пятен, двухленточные и белые вспышки.

¹ http://www.wdcb.ru/stp/solar/solar_flare_events.ru.html

² <https://www.ngdc.noaa.gov/stp/space-weather/solar-data/solar-features/solar-flares/x-rays/goes/xrs/>

³ <https://gong2.nso.edu/HA/haf/>

⁴ <http://jsoc.stanford.edu>

⁵ https://www.ngdc.noaa.gov/stp/space-weather/online-publications/stp_sgd/

⁶ <http://jsoc.stanford.edu>

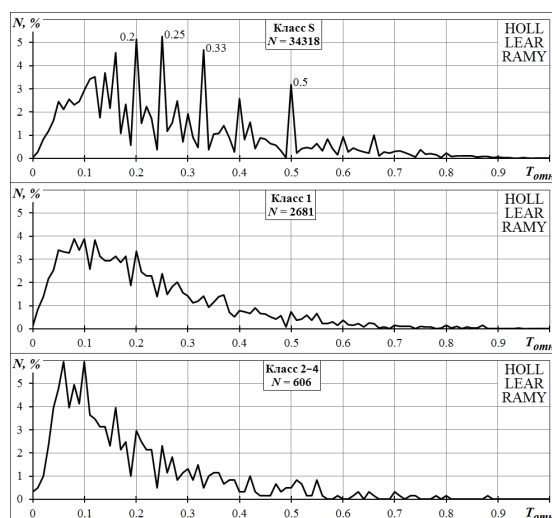


Рис. 1. Распределение относительного времени подъема солнечных вспышек классов площади S, 1, 2–4 в пределах 65° от центрального меридиана по данным обсерваторий HOLL, LEAR, RAMY; N – число вспышек

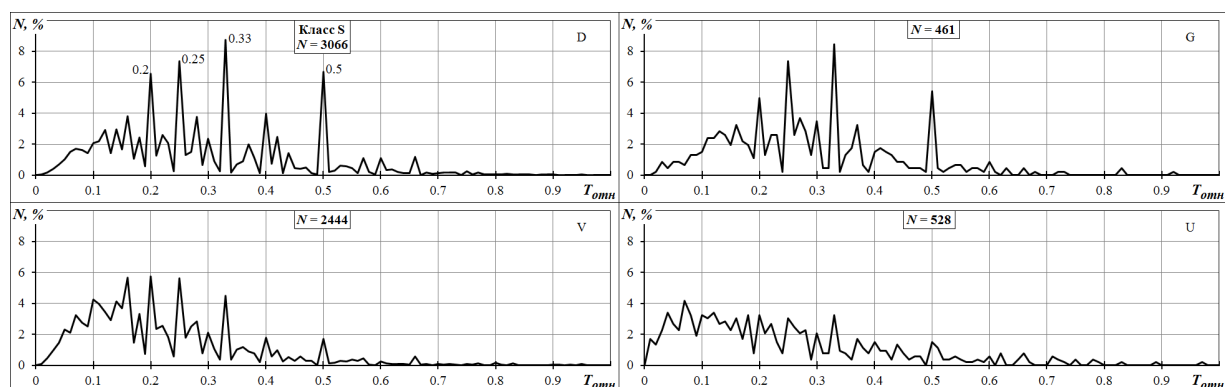


Рис. 2. Распределение относительных времен подъема яркости для четырех типов малых вспышек, зарегистрированных в пределах 65° от центрального меридиана. D – вспышка с одним центром повышенной яркости внутри вспышечной области; G – внепятенная вспышка; V – вспышка взрывного типа; U – двухленточная вспышка

3.1 Энергия солнечных вспышек в оптическом диапазоне

Результаты статистического анализа позволили оценить полную энергию вспышек в оптическом диапазоне длин волн. Согласно работе Курочка, Россада (1981), полная энергия вспышек во всех линиях и континуумах водородных серий тесным образом связана с энергией излучения в линии H_α :

$$E_{\text{п}} = 4.7 \times 10^{-22} \times \alpha(i) \times S(i) \times T(i) \times I_{3,2}^2(i),$$

где i – балл вспышки; $I(i)$ – центральная интенсивность H_α ; $S(i)$ – типичная площадь вспышки; $T(i)$ – типичное время жизни вспышки; $\alpha(i)$ – коэффициент, учитывающий распределение интенсивности во вспышке. Используя данные $\alpha(i)$ и $I_{3,2}(i)$ из работы Курочка, Россада (1981) и распределения вспышек по площади $S(i)$ и продолжительности $T(i)$ (рис. 3, 4), получены распределения солнечных вспышек по энергиям в зависимости от класса площади и балла вспышек (рис. 5). Из гистограмм следует, что между оптическими вспышками разных классов площади присутствует взаимное перекрытие по энергиям, в результате которого в интервал энергий крупных солнечных вспышек (классов 2–4) попадает до 9.5% вспышек малой мощности. Со вспышками класса 1 перекрытие еще более значительное (Borovik, Zhdanov, 2019). Это свидетельствует о том, что в оптиче-

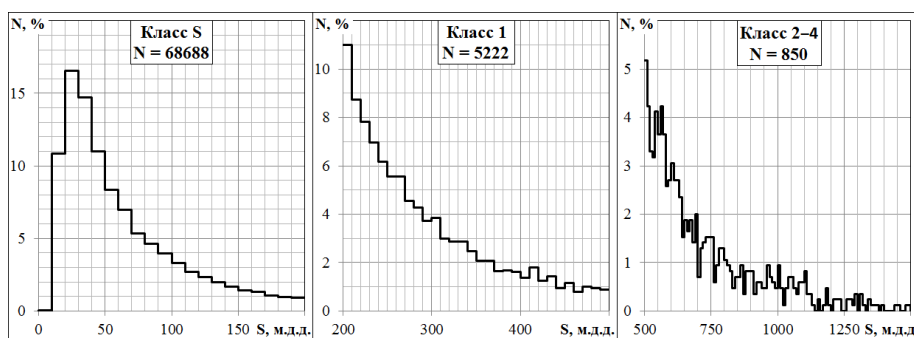


Рис. 3. Распределение солнечных вспышек классов S, 1, 2–4 по площади с учетом перспективного сокращения в пределах 65° от центрального меридиана (Borovik, Zhdanov, 2017a)

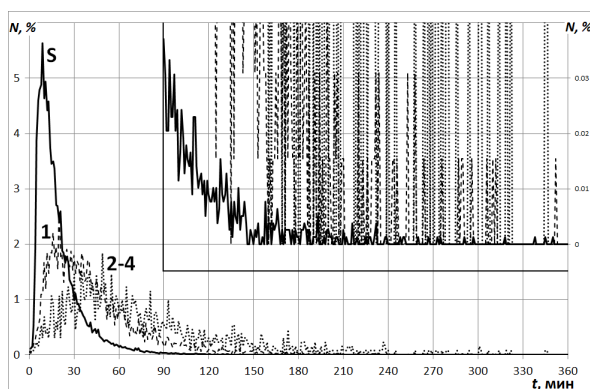


Рис. 4. Распределение вспышек классов площади S, 1 и 2–4 по продолжительности (Borovik, Zhdanov, 2018b)

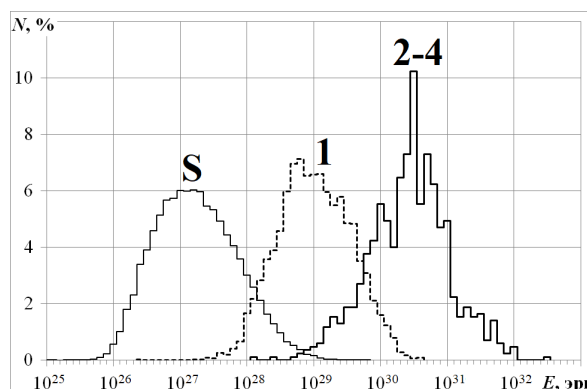


Рис. 5. Распределение солнечных вспышек по энергиям

ском диапазоне вспышки малой мощности могут иметь энергию, сопоставимую с энергией крупных солнечных вспышек.

3.2 Связь между оптическим и рентгеновским излучением солнечных вспышек

Вспышечное событие на Солнце охватывает практически все доступные диапазоны электромагнитного излучения, а также эмиссию нейтральных частиц, выбросы и крупномасштабные ударные волны. Анализ теплового и нетеплового излучения вспышек показывает сложность механизмов, лежащих в основе происходящих процессов. Достоверно установлено, что существует связь между потоком жесткого и мягкого рентгеновского излучения вспышки (Neupert, 1968). Относительно оптического излучения как части сложного гидродинамического отклика хромосферы на импульсный нагрев пучками заряженных частиц пока однозначных выводов нет (Fletcher et al., 2011; Somov, 1992; Богачев и др., 2020). Нет также уверенных выводов относительно связи площади оптических вспышек и мощности рентгеновского излучения (Алтынцев и др., 1982). Обладая большим объемом данных, в работе Borovik, Zhdanov (2020) было показано, что вспышки малой мощности, как и крупные солнечные вспышки, могут сопровождаться потоками протонов и рентгеновским излучением разной мощности, в том числе класса X. Например, в 21–24 солнечных циклах⁷ из 179 протонных событий к оптическим вспышкам малой мощности относились 6% (11), к вспышкам класса площади 1 – 22% (40), к крупным вспышкам (2–4) – 72% (128). Из 369 вспышек рентгеновского класса X вспышки малой мощности составляли 9%, вспышки класса 1 – 22%, крупные вспышки (2–4) – 69%. Для вспышек рентгеновского класса M (4222 вспышки) – 39%, 46% и 15% соответственно.

⁷ <https://umbra.nascom.nasa.gov/SEP>

Обнаружено, что корреляционные гистограммы между классами площади оптических вспышек и мощностью рентгеновского излучения показывают существенное перекрытие в рентгеновских классах С и М (рис. 6). Наиболее высокая корреляция присутствует между оптическими класса-

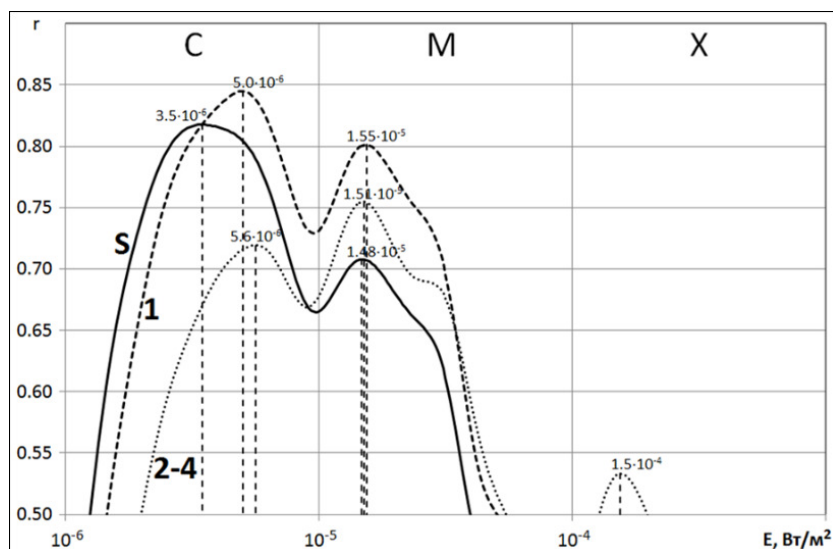


Рис. 6. Распределение коэффициентов корреляции между оптическими классами вспышек и максимальной амплитудой рентгеновского всплеска по месяцам (09.1986–06.2017)

ми вспышек S, 1 и рентгеновским классом С (выше 0.8). Для крупных вспышек (2–4) $r = 0.73$. Максимальным коэффициентам корреляции соответствуют мощности рентгеновского излучения $(3.5, 5.0, 5.6) \cdot 10^{-6}$ Вт/м². С увеличением мощности рентгеновского излучения в рентгеновском классе М появляется еще один более низкий корреляционный максимум, одинаковый для всех оптических классов вспышек и равный мощности излучения $\sim 1.5 \cdot 10^{-5}$ Вт/м². В классе Х только у вспышек 2–4 присутствует невысокий корреляционный максимум ($r = 0.53$, $E = 1.5 \cdot 10^{-4}$ Вт/м²).

Полученные результаты свидетельствуют, что вспышки всех оптических классов, в том числе вспышки малой мощности, могут сопровождаться с почти одинаковой вероятностью рентгеновским излучением класса С и М, в редких случаях – мощным излучением класса Х.

4 Центры вспышечной активности вспышек малой мощности

Одной из выявленных характерных особенностей солнечных вспышек малой мощности являются центры вспышечной активности (ЦВА) – плотные скопления малых вспышек (рис. 7). Их вклад в общий уровень вспышечной активности на всех стадиях развития групп солнечных пятен является определяющим. Как правило, ЦВА имеют ядро (иногда два), где плотность вспышек максимальная. От ядра к периферии число вспышек снижается. 93.3% ЦВА наблюдаются в течение одного прохождения АО по диску Солнца, 6.7% – в двух и более последовательных солнечных оборотах, отдельные центры могут существовать до четырех оборотов. Существует высокая корреляция ЦВА с числами Вольфа ($r = 0.8$). За время прохождения активной области по диску Солнца вспышечная активность ЦВА может продолжаться в течение 1.6–9 суток, в отдельных случаях до 11 суток. В области центров вспышечной активности наблюдаются системы арочных волокон, серджи, происходят возмущения и исчезновения волокон. Во время интенсивного роста магнитного потока и всплывания новых магнитных полей частота вспышек в центрах вспышечной активности резко увеличивается, происходят серии вспышек.

Обнаружено, что мощные вспышки оптических классов 2–4 возникают главным образом в тех активных областях, где ЦВА появляются многократно, сохраняя на протяжении нескольких кэррингтоновских оборотов устойчивое положение. Обычно крупные вспышки происходят в отсутствие малых вспышек или на фоне слабой их активности. В среднем за 7.8 часа до крупной вспышки малые вспышки прекращаются и после ее начала возникают не ранее чем через 6.7 часа. В областях,

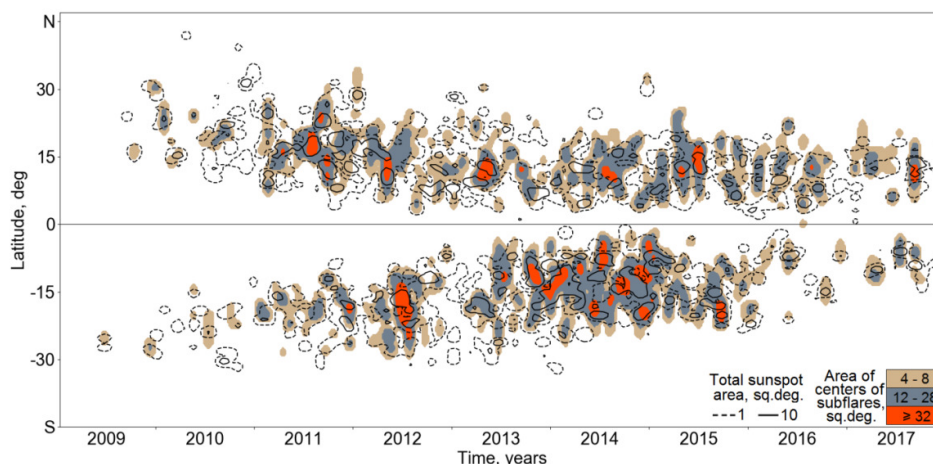


Рис. 7. Широтное распределение центров вспышечной активности в 24-м цикле (Borovik et al., 2020)

где развиваются ленты крупных вспышек, малые вспышки также практически не встречаются или их число незначительно. Вследствие этого в активной области, вероятно, происходит накопление свободной магнитной энергии для крупной мощной вспышки.

Полученные результаты дают основания рассматривать центры вспышечной активности как индикаторы всплывающих на Солнце магнитных потоков, что позволяет проводить диагностику нестационарных процессов в атмосфере Солнца в глобальном аспекте (Borovik et al., 2020).

5 Солнечная конвекция и вспышки малой мощности

Существует множество фактов, указывающих на важную роль солнечной конвекции в происхождении многих активных явлений на Солнце. Впервые конвективные ячейки (супергранулы) были обнаружены по наблюдениям лучевых скоростей на уровне фотосферы в спокойных областях Солнца (Simon, Leighton, 1964). Супергранулы имеют размеры от 20 до 54 тыс. км (среднее значение 32 тыс. км), время существования ~ 20 часов. В конвективных ячейках солнечная плазма движется от центра к краю со скоростью 0.3–0.5 км/с, где опускается со скоростью 0.1 км/с.

По наблюдательным материалам, полученным на хромосферном телескопе полного диска Солнца с высоким пространственным и временным разрешением, было изучено более 130 вспышек малой мощности. Обнаружено, что они, как правило, возникают и развиваются на границах ячеек хромосферной и магнитной сеток (рис. 8, 9). Вспышечные ячейки имеют вытянутую эллипсоидную форму. Обычно эмиссия охватывает часть границы ячейки, но в некоторых случаях “загорается” вся граница.

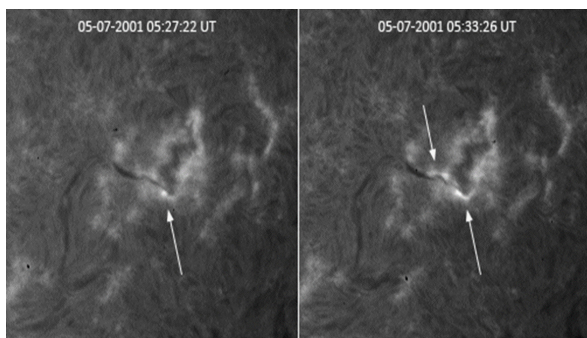


Рис. 8. Вспышки малой мощности в линии H_{α} (БАО)

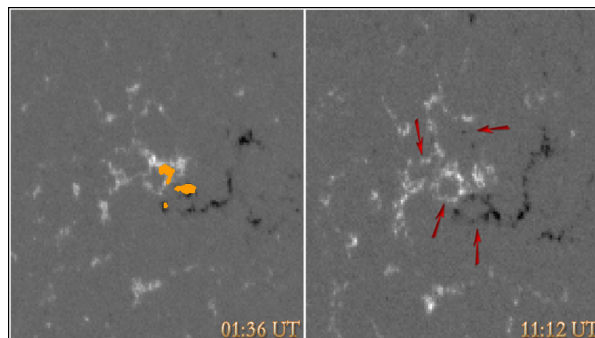


Рис. 9. Внепятенная вспышка 28 мая 2002 г. Магнитограммы SOHO/MDI до и после вспышки. Стрелки указывают на эволюционные изменения в структуре магнитного поля спокойной области

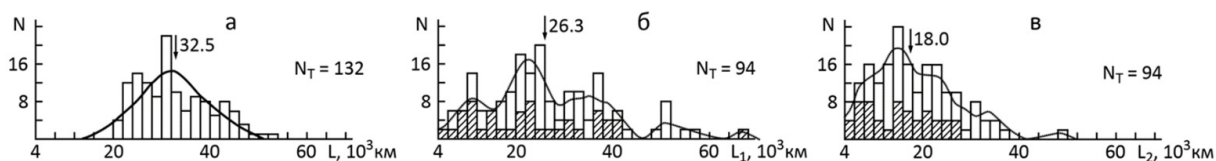


Рис. 10. Распределение вспышечных ячеек по размерам (Borovik, 1990). Штриховкой выделены вспышки, имеющие форму ячеек. а – распределение Лейтона; б – большие оси ячеек (L_1); в – малые оси ячеек (L_2)

Распределение вспышечных ячеек по размерам показывает значительно более широкий размах, чем у супергранул (рис. 10). Средние размеры ячеек (26 тыс. км) меньше, чем средний размер супергранул (32.5 тыс. км). Наряду с главными максимумами присутствует максимум на 10–12 тыс. км, что свидетельствует о том, что хромосферная сетка активных областей содержит мелкомасштабные конвективные ячейки, близкие по размеру к розеткам супергранул и мезогранулам (5–10 тыс. км).

6 Предвспышечные активизации хромосферных структур

Важное значение для прогноза и физики солнечных вспышек имеют предшествующие и сопровождающие вспышки динамические процессы в атмосфере Солнца. Известно, что в активной области

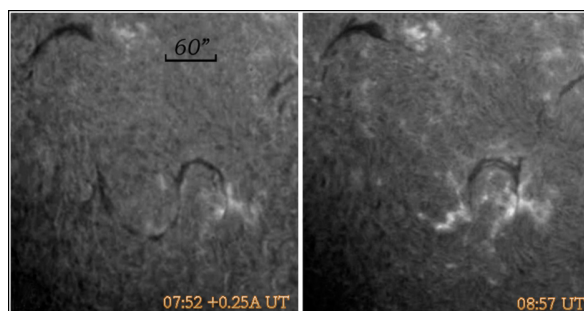


Рис. 11. Активизация волокна перед внепятенной вспышкой малой мощности 05.06.2002 г. (БАО)

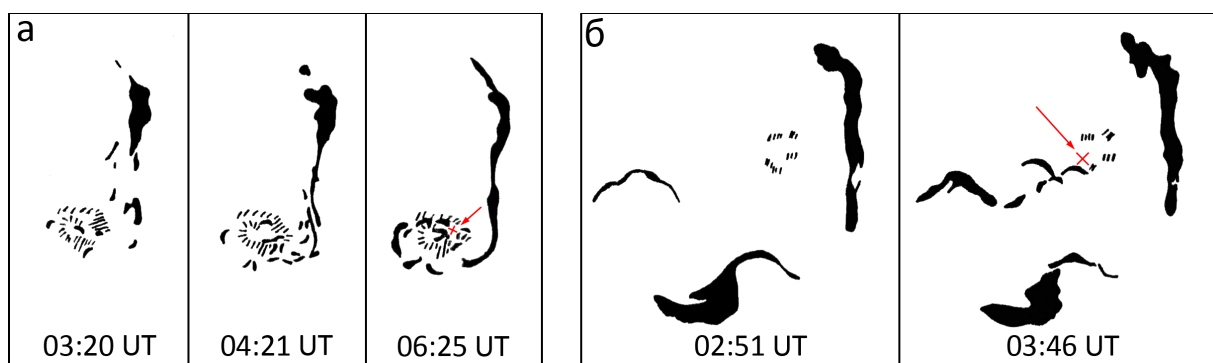


Рис. 12. Активизации волокон перед вспышками малой мощности: а – вспышка 30 октября 1980 г. (S18W23); б – внепятенная вспышка 31 октября 1980 г. (N24E23). Положения вспышечных узлов отмечены красными крестиками и указаны стрелками

примерно за час до крупных вспышек происходят изменения в тонкой структуре хромосферы, наблюдаются активизации волокон с полным или частичным их исчезновением. Обычно их связывают с локальными возмущениями магнитных полей активной области.

Подробное исследование предвспышечных активизаций хромосферы перед вспышками малой мощности было выполнено в работе [Borovik \(1989\)](#) для 42 малых вспышек. Рассматривались только те активизации, которые были связаны с областями вспышек (рис. 11, 12). Установлено, что 85% такого рода вспышек сопровождаются крупномасштабными возмущениями хромосферы, распространяющимися от места вспышки на 90–500 тыс. км, и мелкомасштабными (10–60 тыс. км). Крупномасштабные активизации проявляют себя за 40–50 минут до начала вспышки, мелкомасштабные – в пределах одного-двух ближайших к вспышкам ярусов супергрануляционных ячеек за 10–20 минут. В 49% случаев наблюдались оба типа активизаций, в 11% – только крупномасштабные активизации и в 40% – только мелкомасштабные. Предполагается, что причиной активизаций хромосферных структур перед вспышками малой мощности являются крупномасштабные возмущения магнитных полей активной области.

7 Вспышки малой мощности в развивающейся активной области СД N135 (NOAA 4520)

Связь вспышек малой мощности с конвективными ячейками, крупномасштабными изменениями магнитных полей и всплыванием новых магнитных потоков получила свое подтверждение при исследовании развивающейся активной области N135 (нумерация бюллетеня “Солнечные данные”) в рамках наблюдательной программы 1984 года “Крупномасштабные поля и рождение активных областей” ([Боровик и др., 1986](#)). С первых дней образования активная область отличалась бурным развитием (рис. 13, 14). В ней происходило интенсивное опускание вещества, совпадающее в большинстве случаев с порами и холмами магнитного поля. На доплеровграммах Саянской обсерватории ИСЗФ СО РАН отчетливо были видны кольцеобразные структуры опускающегося потока. Размер конвективных ячеек соответствовал размеру супергранул. Наблюдалось соответствие между сеткой поля скоростей и магнитной сеткой. Изменения структуры ячеек показывали, что на стадии появления пятна и усиления его магнитного потока пятно находилось на стыке границ соседних конвективных ячеек. По мере развития АО структура поля скоростей усложнялась. Наблюдалось измене-

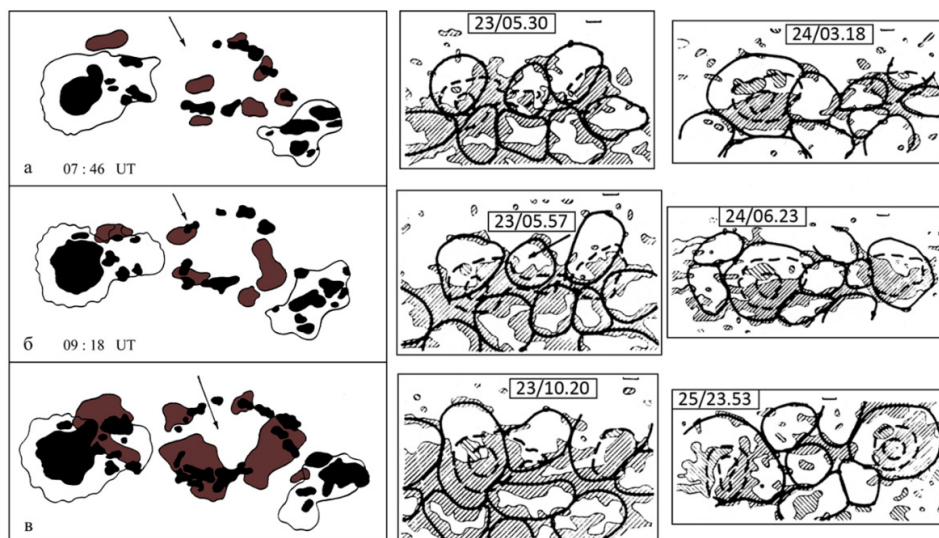


Рис. 13. Поле скоростей и пространственное распределение вспышек малой мощности в активной области СД N135 23 июня 1984 г. (пятна зарисованы черным цветом, вспышечные поля – коричневым)

ния интегрального магнитного потока и интегральной напряженности магнитного поля (рис. 14б). Именно в этот период роста параметров магнитного поля наблюдался всплеск вспышечной активности (рис. 14а) и ближайшее к активной области волокно постепенно стало увеличивать свою длину

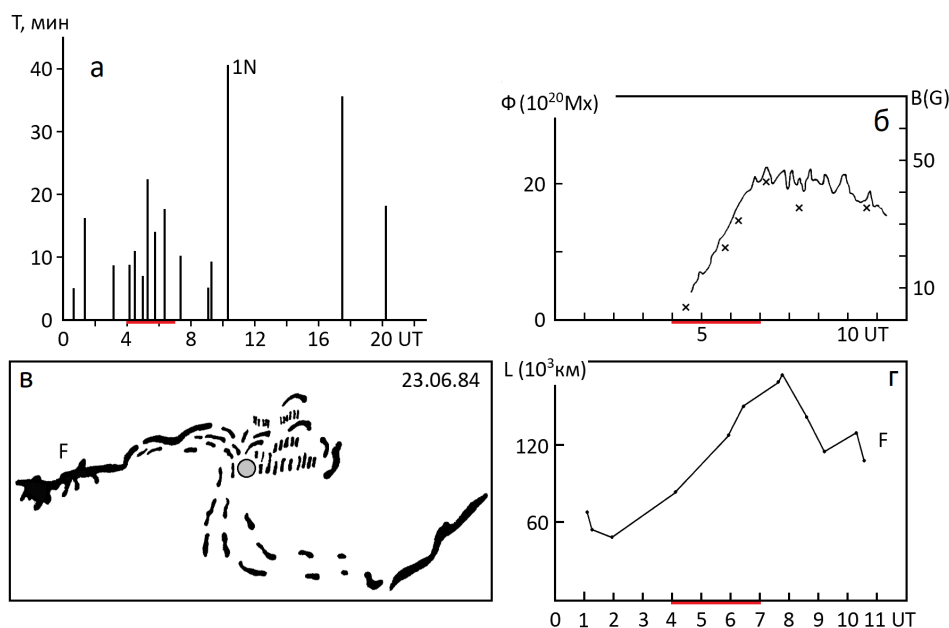


Рис. 14. Вспышки малой мощности 23 июня 1984 г. в развивающейся активной области СД N135 (Боровик и др., 1986): а – развитие вспышечной активности; б – изменение интегрального потока (Φ) и интегральной напряженности магнитного поля (B); в, г – изменение длины волокна F

(рис. 14в,г). Малые вспышки последовательно появлялись вдоль границы конвективной ячейки размером 26 тыс. км (указана стрелкой на правой панели рис. 13). На фотосфере ячейку “трассировали” цепочки мелких пятен и пор, в хромосфере она совпадала с ячейкой хромосферной сетки. Вспышечные узлы располагались вблизи групп мелких неустойчивых пятен. На рисунке 13а,б стрелками указан случай, когда появление вспышки малой мощности совпало по месту и времени с появлением в АО двух мелких пор. Рисунок 13в показывает совмещенную картину расположения солнечных пятен и вспышек малой мощности в активной области 23 июня 1984 года.

8 Внепятенные вспышки

Основным отличием внепятенных вспышек от вспышек в группах пятен является их возникновение в невозмущенных “спокойных” областях Солнца. Считается, что внепятенные вспышки более продолжительные, показывают медленный рост яркости к максимуму и довольно протяженный спад. Они могут быть достаточно мощными и сопровождаться всплесками микроволнового и мягкого рентгеновского излучения (Dodson, Hedeman, 1970). В годы минимума солнечной активности число внепятенных вспышек возрастает почти вдвое.

Было установлено (Borovik, Myachin, 2002), что внепятенным вспышкам, как и вспышкам в группах пятен, предшествует период эволюции магнитных полей “спокойной” области, сопровождающийся активизацией волокон и крупномасштабным изменением тонкой структуры хромосферы (рис. 15). Наибольшая частота предвспышечных событий и явлений приходится, как и в группах пятен, на интервал в 10–60 минут до начала вспышки. Следует сказать, что богатая тонкая структура спокойных областей реагирует на изменения магнитных полей довольно отчетливо (в развитых активных областях она в основном подавлена). В результате были обнаружены неизвестные ранее или крайне редко встречающиеся предвспышечные возмущения хромосферы – вихревые структуры S-типа, темные ячейки, “ленточные каналы”, предвспышечные изменения интенсивности темных узлов в области вспышки (Borovik, Myachin, 2002). Полученные результаты убеждают, что причиной таких возмущений являются крупномасштабные изменения магнитных полей спокойной области.

Как правило, внепятенные вспышки возникают на границах хромосферной и магнитной сеток вблизи холмов усиленного магнитного поля (рис. 16), в которых во время вспышек наблюдается рост напряженности (в отдельных случаях в несколько раз).

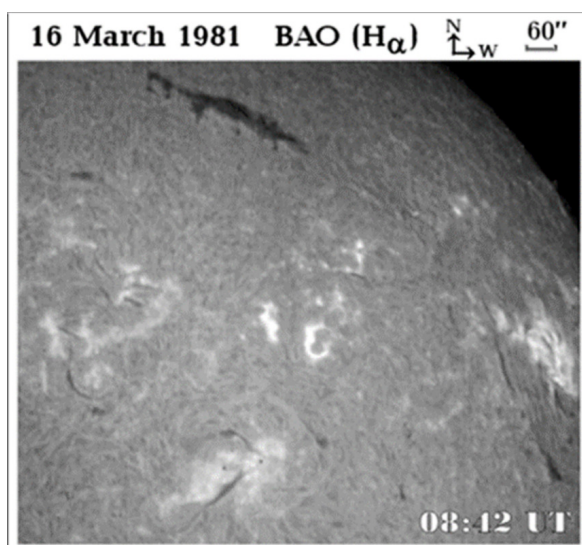


Рис. 15. Внепятенная вспышка 16 марта 1981 г. по наблюдениям в линии H_{α} в Байкальской астрофизической обсерватории

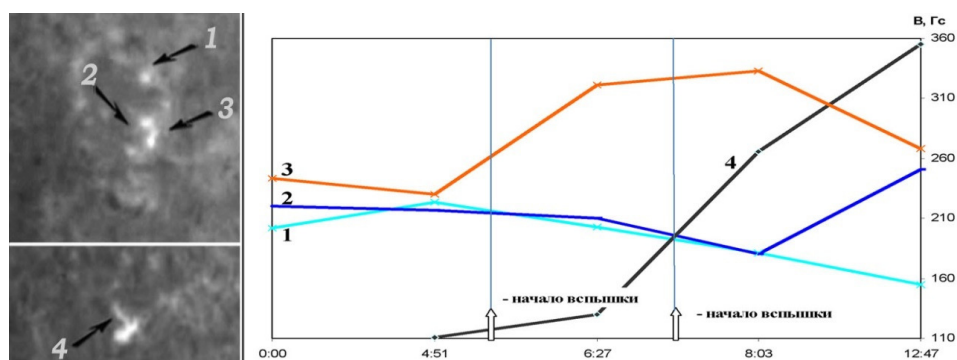


Рис. 16. Изменения напряженности поля в магнитных холмах во время внепятенных вспышек 28 июня 2001 г. (Боровик и др., 2014)

Развитие вспышечной эмиссии, как и в активных областях с пятнами, происходит по границам конвективных ячеек последовательно от одного магнитного холма к другому. Диффузные части вспышек, как правило, расположены в областях слабых полей и гаснут в первую очередь. Самое продолжительное время существуют наиболее яркие участки вспышки, с которыми, как было установлено (Svestka et al., 1982), связаны корональные вспышечные петли. Ленты внепятенных вспышек могут возникать на значительном удалении от линии раздела полярности, причем расхождение лент может не наблюдаться.

Впервые подтверждены результаты работы Falciani, Rigutti (1972) о присутствии во вспышках эффекта сжатия изофот. Исследование изофотометрической структуры внепятенной вспышки 16 марта 1981 г. показывает, что характер изменения параметров пульсаций интенсивности вспышек в линии H_{α} несет в себе информацию о динамике вспышечных процессов, протекающих в короне – пересоединении магнитных аркад, инжекции частиц в хромосферу. Модифицированный нами метод изучения изофотометрических структур солнечных вспышек дает дополнительные возможности для комплексного исследования вспышечных процессов, протекающих на разных уровнях солнечной атмосферы.

Результаты проведенного исследования показывают, что большинство событий и явлений, сопровождающих вспышки в группах солнечных пятен, наблюдаются и в спокойных областях Солнца во

время вспышек. Это свидетельствует о том, что условия возникновения вспышек в невозмущенных пятнами спокойных областях Солнца принципиально не отличаются.

9 Вспышки малой мощности и линии раздела полярности активных областей

Исследование активной области NOAA 12673 подтвердило, что вспышки малой мощности возникают во время крупномасштабных изменений магнитного поля активной области (рис. 17, 18).

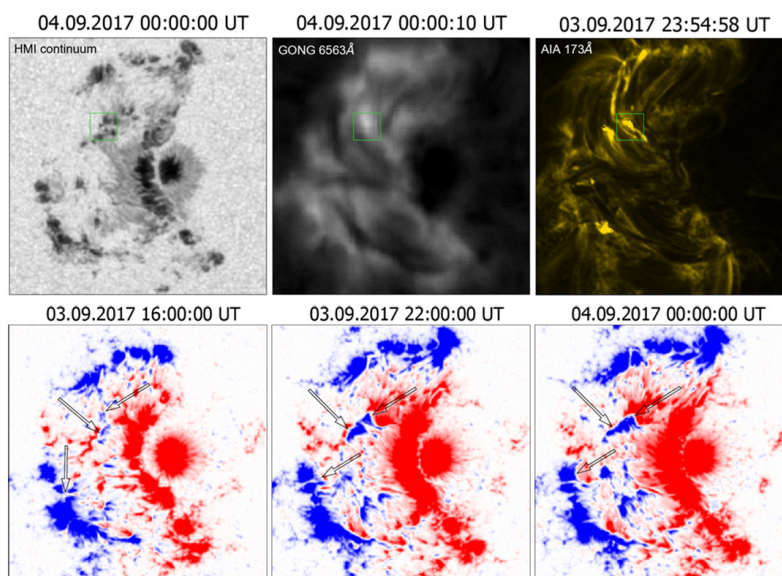


Рис. 17. Образование локальных ЛРП в активной области NOAA 12673. На магнитограммах SDO/HMI синим и красным цветом выделены поля соответственно северной и южной полярности. Стрелками указаны три области формирования ЛРП

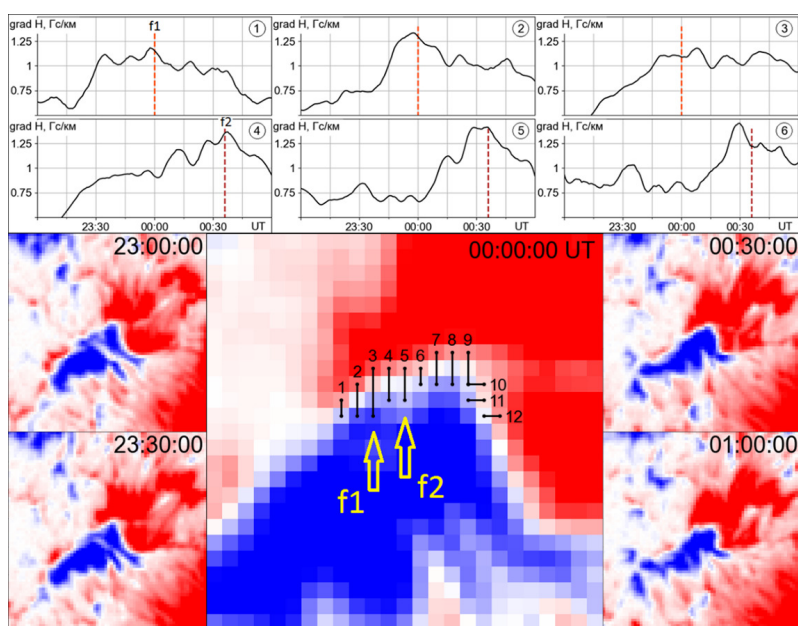


Рис. 18. Изменение градиента продольного магнитного поля вблизи ЛРП в области вспышек малой мощности (f_1 , f_2). f_1 показана на рис. 17

Обнаружено, что в отличие от крупных солнечных вспышек, малые вспышки происходят вблизи локальных короткоживущих мелкомасштабных линий раздела полярностей (ЛЛРП), формирующихся в результате всплытия в активной области новых магнитных потоков с последующим их перемещением (под действием поверхностных течений солнечной плазмы) и сближением с потоками противоположной полярности. К возникновению малых вспышек, вероятно, приводит рост градиента магнитного поля до значений 1.3–1.5 Гс/км, наблюдаемый на отдельном участке ЛЛРП в области вспышек (Borovik, Zhdanov, 2022). Протяженность таких участков составляет ~ 1 –1.5 угл. секунды. На других участках ЛЛРП таких явлений не наблюдалось.

Согласно современным модельным представлениям, такие процессы ведут к образованию токовых слоев, пересоединению силовых линий магнитных полей противоположной направленности и импульсному высвобождению свободной энергии магнитного поля в виде вспышки. Анализ мощной вспышки 6 сентября 2017 года рентгеновского класса X9.3 показал, что перед ней наблюдалось аналогичное явление. При этом градиент магнитного поля на отдельном участке главной ЛРП достигал значения 3–3.5 Гс/км.

10 Заключение

В результате проведенного исследования получены наиболее полные на сегодняшний день и статистически достоверные данные о параметрах солнечных вспышек в линии H_{α} . Для вспышек малой мощности обнаружена высокая корреляция между продолжительностью и временем подъема яркости к максимуму. Получены свидетельства того, что выделение энергии во вспышках малой мощности носит дискретный характер.

Установлено, что с точки зрения особенностей развития, вспышки малой мощности принципиально не отличаются от более мощных солнечных вспышек. Они, как в активных, так и спокойных областях хромосферы, сопровождаются схожими с крупными мощными вспышками сценариями развития. Полученные результаты показывают, что большинство предвспышечных явлений в хромосфере, сопровождающие солнечные вспышки, отражают общую динамику магнитных полей активных областей, в результате которой только в отдельных случаях возникают условия для вспышек. Особенностью малых вспышек является их тесная связь с холмами усиленного магнитного поля на границах хромосферной и магнитной сеток и мелкомасштабными локальными короткоживущими линиями раздела полярности активных областей. Одним из возможных условий возникновения вспышек малой мощности, как и крупных вспышек, является рост градиента магнитного поля в области вспышки до определенного критического значения. Согласно наблюдениям, это происходит в результате сближения магнитных полей противоположной направленности на отдельном участке линии раздела полярности, что по модельным представлениям приводит к образованию токового слоя, пересоединению силовых линий магнитных полей и вспышке.

Предполагается, что существенное перекрытие распределений вспышек малой мощности по временным параметрам, энергии и мощности рентгеновского излучения со вспышками более высоких классов площади может быть обусловлено энергией, которую несут в себе ускоренные из коронального источника в хромосферу заряженные частицы, и условиями (механизмами) ее распространения в хромосфере.

В результате проведенного исследования дана новая разработка роли и места солнечных вспышек малой мощности в общей структуре солнечной активности. Полученные результаты могут быть использованы для прогноза солнечной активности, геоэффективных солнечных событий, построения физических моделей. Работа выполнена в рамках государственного задания П.16 и поддержана грантом РФФИ 19-52-45002.

Литература

- Алтынцев А.Т., Банин В.Г., Куклин Г.В., Томозов В.М., 1982. Солнечные вспышки. М.: Наука. [Altyntsev A.T., Banin V.G., Kuklin G.V., Tomozov V.M., 1982. Solar flares, M.: Nauka. (In Russ.)]
Богачёв С.А. и др., 2020. Успехи физических наук. Т. 190. № 8. С. 838–858. [Bogachev S.A. et al., 2020. Uspekhi fizicheskikh nauk, vol. 190, no. 8, pp. 838–858. (In Russ.)]

- Боровик А.В., 1989. Исслед. по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца. Т. 87. С. 154–166. [Borovik A.V., 1989. Issled. po geomagnetizmu, aeronomii i fizike Solnca, vol. 87, pp. 154–166. (In Russ.)]
- Боровик А.В., 1990. Исслед. по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца. Т. 91. С. 63–73. [Borovik A.V., 1990. Issled. po geomagnetizmu, aeronomii i fizike Solnca, vol. 91, pp. 63–73. (In Russ.)]
- Боровик А.В., Григорьев В.М. и др. (всего 32 автора), 1986. Contributions of the astronomical observatory Skalnat Pleso, vol. 15, pp. 211–242. [Borovik A.V., Grigoryev V.M., Kargapolova N.N., et al., 1986. Contributions of the astronomical observatory Skalnat Pleso, vol. 15, pp. 211–242. (In Russ.)]
- Боровик А.В., Мячин Д.Ю., Томозов В.М., 2014. Известия ИГУ. Сер. Науки о Земле. Т. 7. № 1. С. 23–45. [Borovik A.V., Myachin D.Yu., Tomozov V.M., 2014. Izvestiya IGU. Ser. Nauki o Zemle, vol. 7, no. 1, pp. 23–45. (In Russ.)]
- Курочка Л.Н., Россада В.М., 1981. Солнечные данные. № 7. С. 95–100. [Kurochka L.N., Rossada V.M., 1981. Solnechnye dannye, no. 7., pp. 95–100. (In Russ.)]
- Прист Э., 1985. Солнечная магнитная гидродинамика. М.: Мир. [Prist E., 1985. Solar magnetic hydrodynamics, M.: Mir. (In Russ.)]
- Северный А.Б., Шапошникова Е.Ф., 1961. Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. Т. 24. С. 235–257. [Severnyi A.B., Shaposhnikova E.F., 1961. Izv. Krymsk. Astrofiz. Observ., vol. 24, pp. 235–257. (In Russ.)]
- Смит Г., Смит Э., 1966. Солнечные вспышки. М.: Мир. [Smit G., Smit E., 1966. Solar flares, M.: Mir. (In Russ.)]
- Borovik A.V., Myachin D.Yu., 2002. Solar Phys., vol. 205, pp. 105–116.
- Borovik A.V., Zhdanov A.A., 2017a. Solar-Terrestrial Physics, vol. 3, no. 1, pp. 40–56.
- Borovik A.V., Zhdanov A.A., 2017b. Solar-Terrestrial Physics, vol. 3, no. 4, pp. 5–16.
- Borovik A.V., Zhdanov A.A., 2018a. Solar-Terrestrial Physics, vol. 4, no. 3, pp. 3–12.
- Borovik A.V., Zhdanov A.A., 2018b. Solar-Terrestrial Physics, vol. 4, no. 2, pp. 8–16.
- Borovik A.V., Zhdanov A.A., 2019. Solar-Terrestrial Physics, vol. 5, no. 4, pp. 3–9.
- Borovik A.V., Zhdanov A.A., 2020. Solar-Terrestrial Physics, vol. 6, no. 3, pp. 16–22.
- Borovik A.V., Zhdanov A.A., 2022. Solar-Terrestrial Physics, vol. 8. no. 1, pp. 19–23.
- Borovik A.V., Mordvinov A.V., Golubeva E.M., and Zhdanov A.A., 2020. Astron. Rep., vol. 64, no. 6, pp. 540–546.
- Dodson H.W., Hedeman E.R., 1970. Solar Phys., vol. 13, no. 2, pp. 401–419.
- Falciani R., Rigutti M., 1972. Solar Phys., vol. 26, pp. 114–116.
- Fletcher L. et al., 2011. Space Sci. Rev., vol. 159, no. 1–4, pp. 19–106.
- Heyvaerts J., Priest E.R., Rust D.M., 1977. Solar Phys., vol. 53, no. 1, pp. 255–258.
- Howard R., Harvey J.W., 1964. Astrophys. J., vol. 139, no. 5, pp. 1328–1335.
- Neupert W.M., 1968. Astrophys. J., vol. 153, pp. L59–L64.
- Simon G.W., Leighton R.B., 1964. Astrophys. J., vol. 140, pp. 1120–1147.
- Somov B.V., 1992. Physical processes in solar flares, Dordrecht, Boston: Kluwer Academic Publishers.
- Svestka Z., 1975. In Shea M.A., Smart D.F. (Eds), Results obtained during the campaign for integrated observations of solar flares (CINOF). Special reports, AFCRL-TR-75-0437. Air Force Cambridge Research Labs., no. 193, pp. 9–23.
- Svestka Z. et al., 1982. Solar Phys., vol. 75, no. 1–2, pp. 305–329.

Low-power solar flares in the H_{α} line: research results

A. V. Borovik

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

Abstract. The paper summarizes the results of long-term studies of low-power flares in the H_{α} line (optical class S) obtained using data from the international flare patrol, observational materials in the 6563 \AA line of the Baikal Astrophysical Observatory of the ISTP SB RAS and GONG telescopes, observations from the SDO, SOHO, and Kitt Peak Observatory. As a result of the performed studies, the refined, statistically reliable and most complete data on the spatiotemporal parameters of solar flares have been obtained to date, and their total energy in the optical wavelength range has been estimated. Low-power flares were found to form dense clusters on the Sun – centers of flare activity (CFA) associated with regions of emerging magnetic fluxes. It was also found that such flares occur near the local small-scale short-lived polarity inversion lines (LPILs) of a longitudinal magnetic field. One of the identified regularities of their occurrence is the increase in the magnetic field gradient in certain sections of the LPIL in the flare region. The duration of growth is from 40 minutes to 1.5 hours. The magnetic field reaches its maximum gradient (1.3–1.5 G/km) at the time of the flare.

The results of the study show that low-power flares have development scenarios similar to large flares: they are accompanied by activation and eruption of filaments, have an explosive phase, are accompanied by radiation of different power in the X-ray and radio ranges and by proton fluxes. Among them there are flares that cover the sunspot umbra, two-ribbon, and white flares. The results obtained can be used to build physical models, diagnose nonstationary processes on the Sun, predict solar activity and geoeffective solar events.

Key words: solar flares, magnetic fields