

Малые солнечные вспышки и динамика магнитных полей активной области

Боровик А.В., Жданов А.А.

ИСЗФ СО РАН

aborovik@iszf.irk.ru

Абстракт

По фотосферным данным и данным о продольном магнитном поле со спутника SDO, а также по наблюдениям с наземных станций GONG в линии $H\alpha$, исследована вспышечная активность группы солнечных пятен NOAA 12673, которая в сентябре 2017 г произвела крупнейшую за последнее десятилетие вспышку класса X9.3. Установлено, что в активной области сходящиеся магнитные потоки разной полярности образуют локальные линии раздела полярностей (ЛЛРП). 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.

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

1. Введение

Одним из фундаментальных вопросов солнечно-земной физики являются механизмы накопления энергии солнечными вспышками и условия их возникновения. Согласно статистике [1] на Солнце происходит ~1.5% мощных вспышек с энергией $\approx 3 \cdot 10^{32}$ эрг. Наиболее высокую вероятность появления таких вспышек показывают активные области (АО) с "дельта" конфигурацией магнитного поля и высоким фотосферным магнитным потоком [2]. Самые мощные вспышки (класса X) предпочитают появляться в активных областях с сильными магнитными градиентами и сложной структурой магнитного поля. Данные многочисленных исследований свидетельствуют, что для процесса 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 для накопления энергии играют сдвиговые течения, параллельные нейтральной линии, вращение пятен и факельных площадок [3, 4]. Предполагается, что вспышки возникают вследствие ряда неустойчивостей, возникающих в корональных магнитных полях в результате вторжения в АО 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 [5 - 7]. Всплывающий поток в этом случае играет роль триггера, приводящего к высвобождению накопленной магнитной 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 [1]. Это свидетельствует о том, что условия для возникновения малых вспышек (МВ) в атмосфере Солнца формируются довольно часто. Обычно такие вспышки относят к фоновым событиям, в редких случаях рассматривают как явления, сопутствующие крупным вспышкам. Вместе с тем малые вспышки, отличаясь от крупных вспышек по площади и мощности, обладают рядом сходных с ними черт: возникают и развиваются вдоль линий раздела полярностей продольного магнитного поля, сопровождаются активизациями и исчезновением волокон, имеют взрывную фазу, многократные всплески интенсивности. 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 [8, 9]. Согласно современным представлениям малые вспышки относят к структуре типа простой петли. В мягком рентгене МВ характеризуются небольшими объемами, низкими высотами, большими плотностями энергии и короткими временными масштабами. Энергия малых вспышек выделяется обычно в импульсной фазе. Наиболее характерен один всплеск жесткого рентгеновского излучения, продолжающийся около минуты. Предполагается, что малые вспышки, как и крупные, возникают во время всплытия нового магнитного потока [10,11]. В этом качественном сопоставлении малые вспышки принципиально не отличаются от крупных вспышек. 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 малых вспышек на более высоком качественном уровне. В данной работе представлены первые предварительные результаты исследования динамики магнитных полей в области МВ.

2. Наблюдения и обработка данных

Нами была изучена вспышечная активность в группе солнечных пятен NOAA 12673, которая в сентябре 2017 г произвела крупнейшую за последнее десятилетие вспышку класса X9.3. Активная область отличалась бурным развитием, сложной топологией и динамикой магнитного поля [12-14]. Помимо четырех вспышек класса X в активной области наблюдалось множество малых вспышек. Для их исследования мы использовали данные Solar Dynamics Observatory (SDO) с телескопов HMI и AIA (<http://jsoc.stanford.edu>) и наблюдения в линии H α 6563 Å с телескопов GONG (<https://gong.nso.edu>). Для изучения динамики продольного магнитного поля использовались HMI магнитограммы с угловым разрешением 0.5" пиксель⁻¹ и частотой кадров 45 секунд. Фотосферные данные анализировались по изображениям полного диска Солнца в линии 6173 Å. Для идентификации вспышек в ультрафиолете использовалась линия 171Å SDO/ AIA.

3. Результаты

По наблюдениям в линии 6173 \AA и магнитных полей с телескопа HMI было установлено, что на протяжении практически всего времени развития активной области вследствие вспытия, движения и сближения разнополярных магнитных потоков происходило формирование многочисленных локальных ЛРП (ЛЛРП) (рис.1).

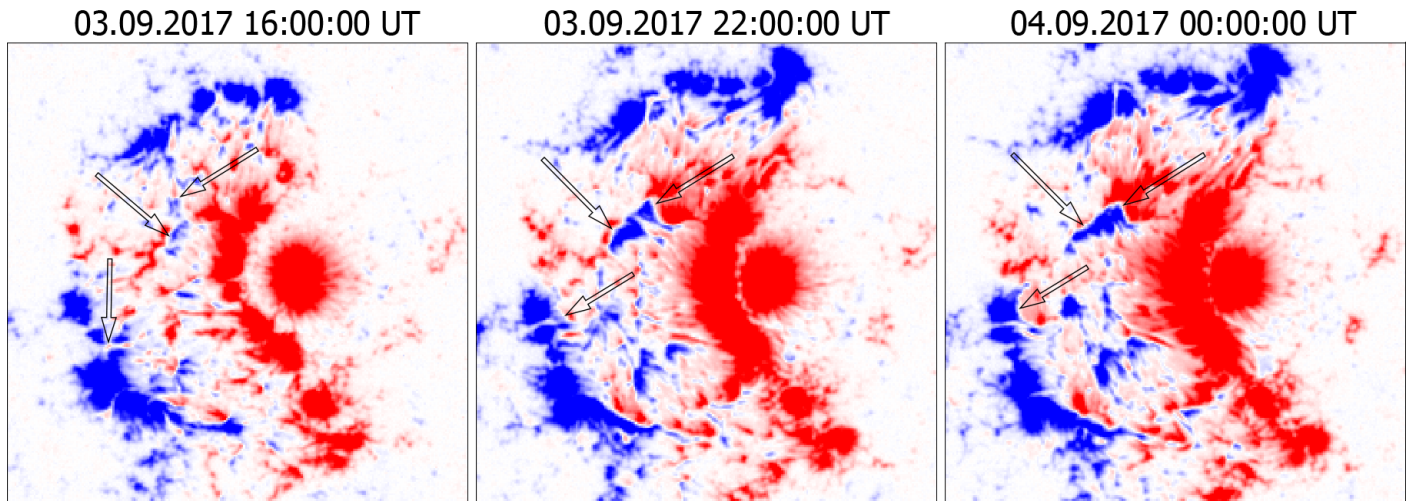


Рис.1. Образование локальных ЛРП в активной области NOAA 12673. На магнитограммах SDO/ HMI синим и красным цветом выделены поля соответственно северной и южной полярности. Стрелками указаны три области формирования ЛЛРП.

Нами было изучено в общей сложности пять малых вспышек в непосредственной близости от ЛЛРП, указанных на рисунке 1. Результаты для всех МВ получены аналогичные.

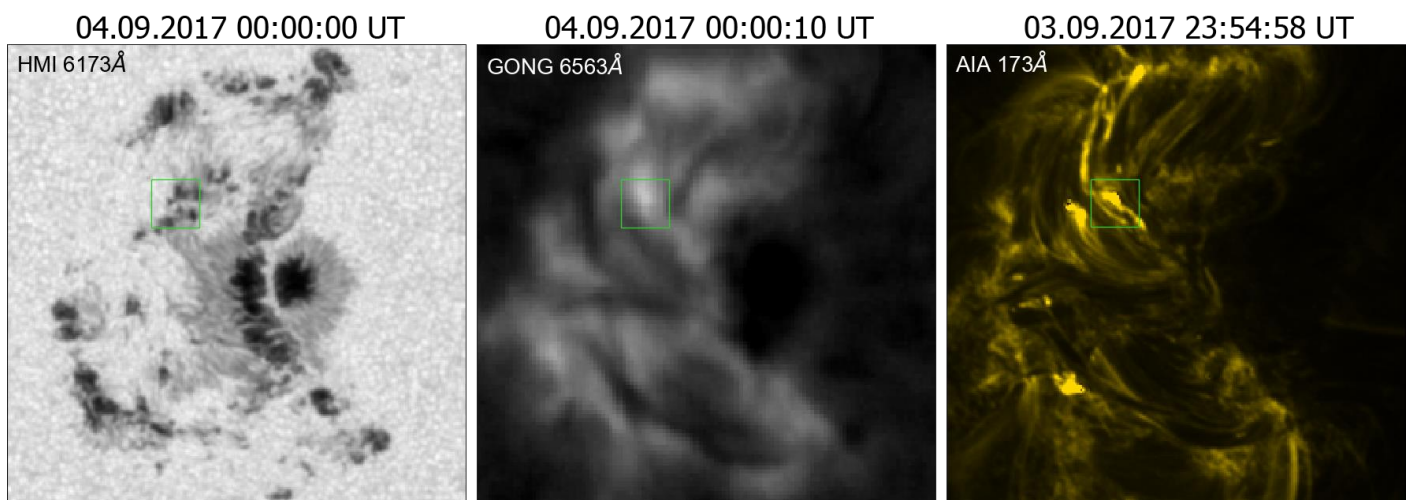


Рис.2. Малая вспышка 4 сентября 2017 (00:00:10 UT) в АО NOAA 12673.

На рисунке 2 представлена вспышка 04.09.2017 (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 (<https://dropmefiles.com/Fn3T5>) и преобразованы в два интервала напряженности: слабые поля до 50 Гс и поля свыше 50 Гс. Это позволило отслеживать всплытия новых магнитных потоков и слабые изменения полей. Дополнительно для контроля над изменениями магнитных полей в выбранной площадке для каждого кадра были сформированы цифровые матрицы напряженности поля.

Анализ данных показал, что вспышка сопровождалась хорошо выраженными изменениями структуры магнитного поля активной области (рис.3).

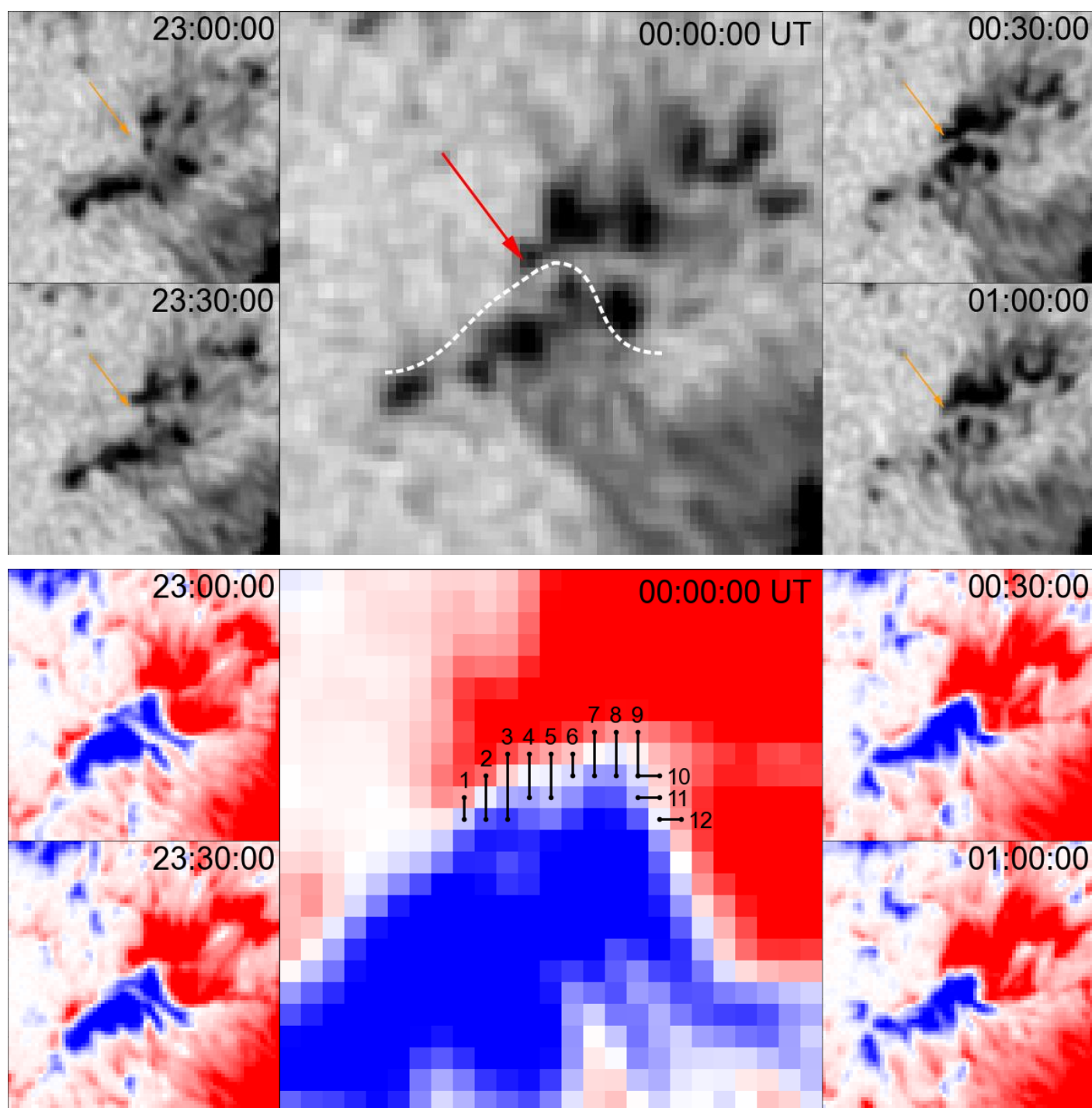


Рис.3. Пятенная активность и изменения продольного магнитного поля в области малой вспышки в интервале двух часов.

До вспышки это выражалось в увеличении площади пятен в результате всплытия магнитных потоков, их сближения и слияния. После вспышки наблюдалось деление 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 в 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 магнитного поля. Полученные графики были сглажены фильтром Савицкого-Голея и приведены на рисунках 4 - 6.

Из рисунка 4 следует, что на отрезках 1, 2 и 3, где по наблюдениям в H_{α} возникла вспышка $f1$, за 45, 20 и соответственно 45 минут 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 $\text{grad } H$.

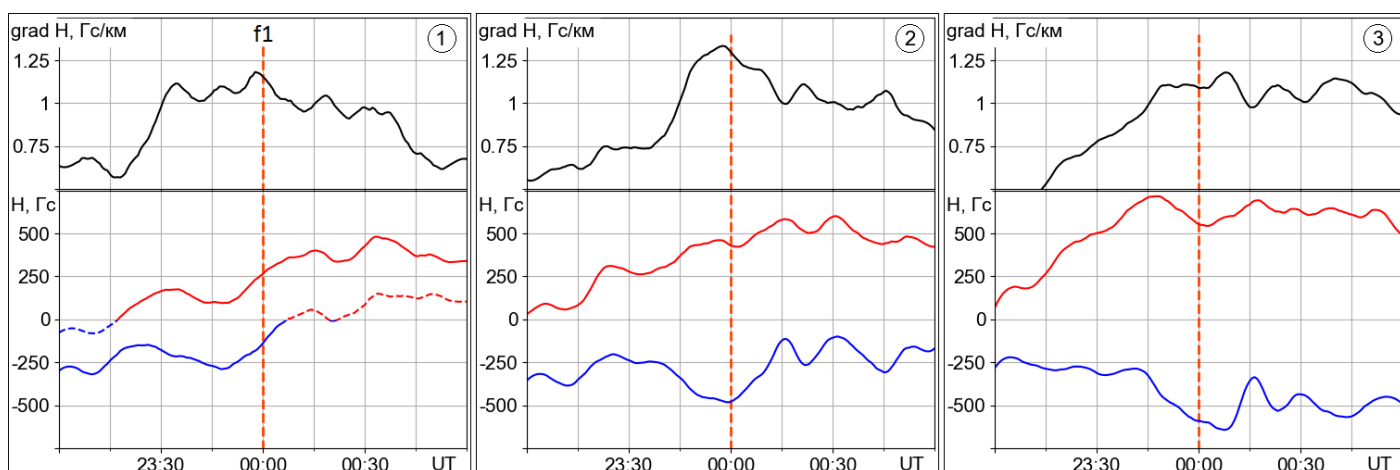


Рис.4. Изменение градиента и напряженности магнитного поля вблизи ЛЛРП в области вспышки.

Красным и синим цветом показаны изменения напряженности магнитного поля соответственно южной и северной полярности.

Примерно через 30 минут после первой вспышки на ЛЛРП на участке 4 - 6 в 00:36:10 произошла вторая малая вспышка $f2$. Графики на рисунке 5 показывает аналогичный рост $\text{grad } H$ перед вспышкой и следующий за ним спад. Максимальный градиент поля в этом случае составил 1.46 Гс/км.

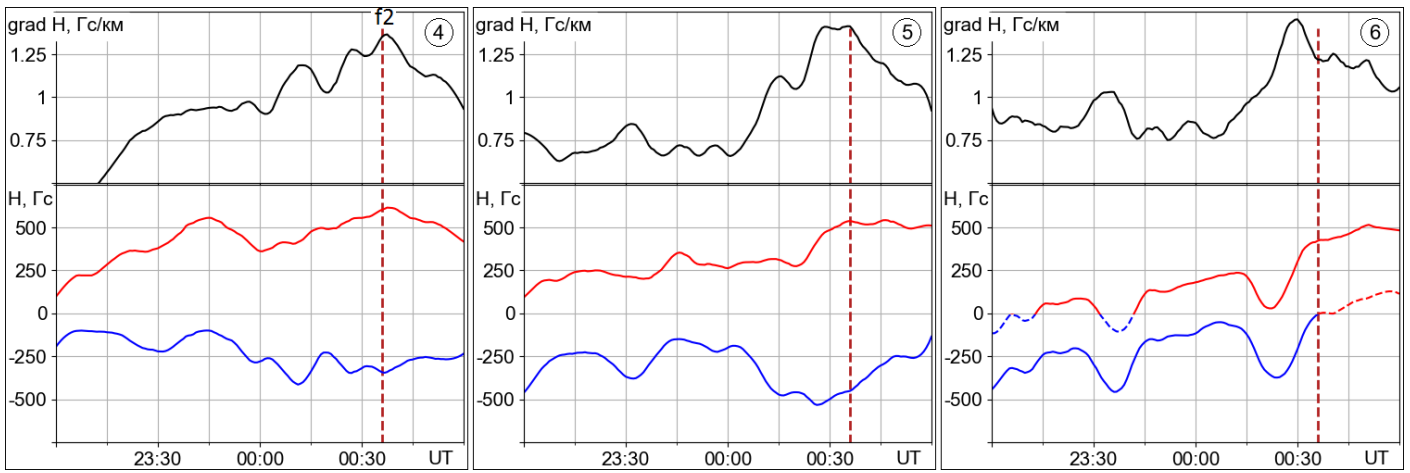


Рис.5. Изменение градиента и напряженности магнитного поля вдоль ЛЛРП в области вспышки f2 (00:36:10) на участке 4 - 6.

На рисунке 6 приведены изменения градиента магнитного поля на участке 7 – 12, где в рассматриваемом временном интервале малых вспышек не было.

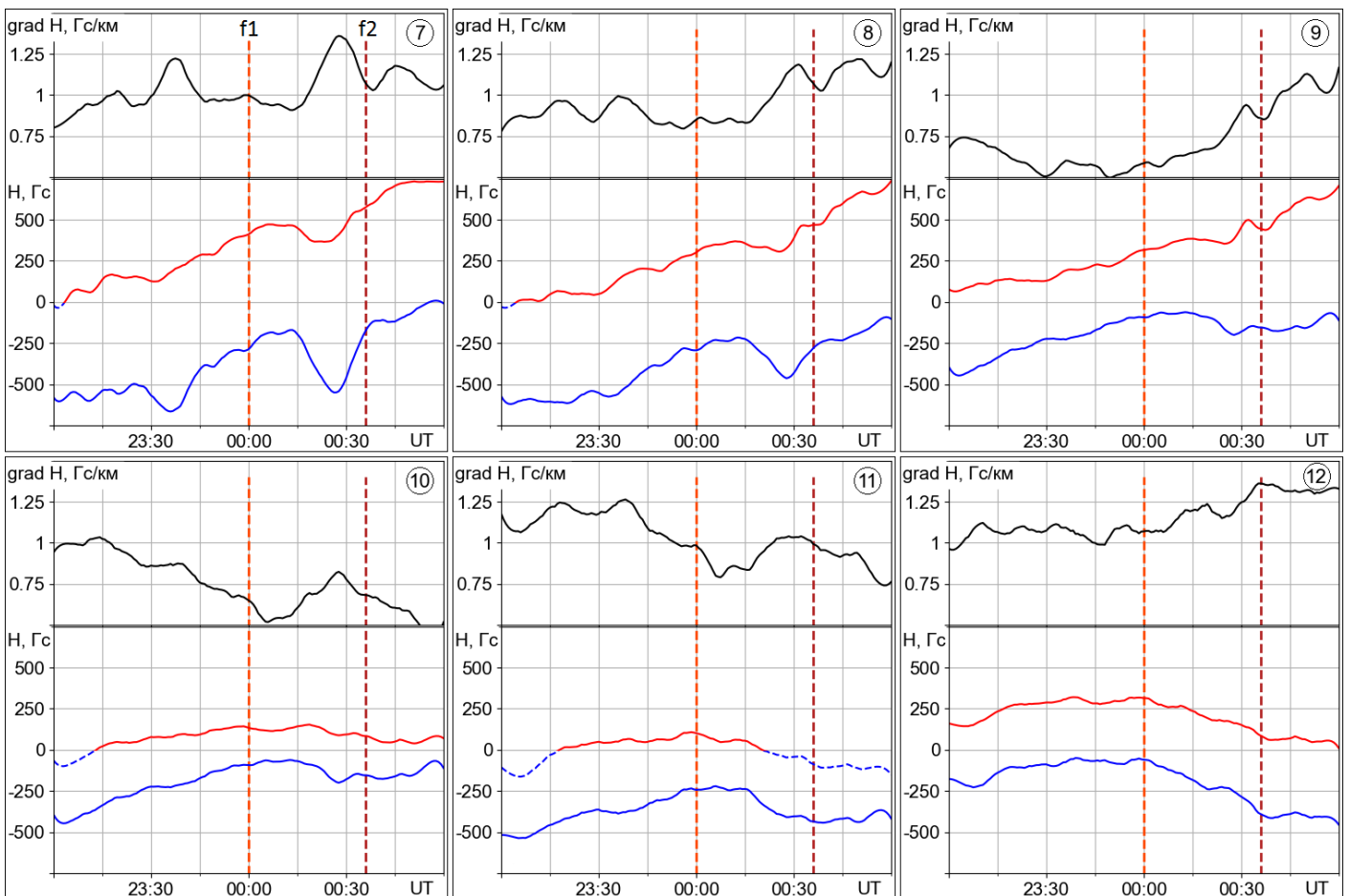


Рис.6. Изменение напряженности и градиента магнитного поля вдоль ЛЛРП на участке 7 - 12.

На этих графиках подобная вспышкам картина фактически отсутствует, за исключением может быть кратковременного всплеска grad H перед вспышкой f2 на отрезке 7. Полученные результаты также показывают, что на отдельных участках ЛЛРП (1, 6 - 8, 10 – 12) между напряженностями поля

разной полярности существует высокая (выше 0.9) корреляционная зависимость. Обращает также на себя внимание тот факт, что перед и после вспышек на ЛЛРП наблюдались замещения магнитных полей одной полярности другой (1, 6, 10, 11), что могло быть связано с «гашением» (cancellation) магнитных потоков противоположной полярности.

Заключение

Первые предварительные результаты исследования динамики магнитных полей в области малых вспышек показали, что малые вспышки сопровождаются хорошо выраженными изменениями в структуре магнитного поля активной области. Малые вспышки происходят на локальных ЛРП, 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 до максимальных значений (в нашем случае 1.3-1.5 Гс/км).

Список литературы

1. Borovik A.V., Zhdanov A.A. Statistical studies of low - power flares. Distribution of flares by area, brightness, and classes. // Solar-Terrestrial Physics. 2017, Vol.3, N 1, pp. 40-56. DOI: 10.12737/22486.
2. 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, N 1, pp. 45-59. DOI: 10.1007/s11207-006-0077-6.
3. 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. 1984, Vol. 91, N 1, pp. 115-126. DOI: 10.1007/BF00213618.
4. Hagyard, M.J., Moore R.L., Emslie A.G. The role of magnetic field shear in solar flares // Adv. Space Res. 1984. Vol.4, N 7, pp. 71-80. DOI: 10.1016/0273-1177(84)90162-5.
5. Priest E.R. Solar flare MHD processes // Pub. Astron. Inst. Acad. Sci. Czech. Republic.1992, Vol. 88, pp. 95-120.
6. Rust D.M., Gauzzi G. Variation of the Vector Magnetic Field in an Eruptive Flare. Word Space Congr.: 43 rd Congr. Int. Astronaut. Fed. (LAF) and 29 th Plen. Meet. Comm. Space Res. (COSPAR). Washington. 1992, P. 486. DOI: 10.1007/3-540-55246-4_73.
7. Somov B.V. Physical processes in solar flares Dordrecht, Boston: Kluwer Academic Publishers. 1992, 249 p.
8. Borovik A.V., Zhdanov A.A. The processes of energy release in low-power solar flares // Solar-Terrestrial Physics. 2019, Vol. 4, N 4, P. 8-16. DOI: 10.12737/stp-41201803.
9. Borovik A.V., Zhdanov A.A. Low-power solar flares of optical and X-ray wavelengths for solar cycles 21–24. // Solar-Terrestrial Physics. 2020, Vol. 6, Iss. 3, pp. 16–22. DOI: 10.12737/stp-63202002.
10. Heyvaerts J., Priest E.R., Rust D.M. An Emerging Flux Model for the solar flare phenomenon // Solar

Phys. 1977, Vol. 53, N 1, pp. 255-258. DOI: 10.1086/155453.

11. Masuda S., Kosugi T., Hara H., Tsuneta S., Ogawara Y. A loop-top hard X-ray source in a compact solar flare as evidence for magnetic reconnection // Nature. 1994, Vol. 371, pp. 495-497. DOI: 10.1038/371495a0.
12. Meetu Verma. The origin of two X-class flares in active region NOAA 12673. Shear flows and head-on collision of new and preexisting flux. // A&A.2018. Vol. 612, A101, pp.7. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201732214>
13. 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, N 4, pp. 15.
14. Shuhong Yang, Jun Zhang, Xiaoshuai Zhu, Qiao Song. Block-induced Complex Structures Building the Flare-productive Solar Active Region 12673. // The Astrophysical Journal Letters. 2017, Vol. 849, L21, pp. 7. <https://doi.org/10.3847/2041-8213/aa9476>.