

УДК 523.98

Изменения напряженности магнитных полей в пятне с δ -конфигурацией во время вспышки

А.Н. Бабин, А.Н. Коваль

ФГБУН “Крымская астрофизическая обсерватория РАН”, Научный, Крым, 298409
babin@crao.crimea.ua

Поступила в редакцию 11 ноября 2015 г.

Аннотация. Анализируются фотографические спектральные наблюдения магнитных полей в двух ядрах пятна с δ -конфигурацией (δ -пятно), полученные с высоким временным разрешением 9 августа 2011 г. во время вспышки балла 2В/Х6.9. Обнаружены быстрые изменения напряженности магнитного поля во время импульсной фазы вспышки, которые совпадают по времени с всплесками в микроволновом и жестком рентгеновском излучении.

VARIATIONS OF THE MAGNETIC FIELD STRENGTH IN THE DELTA-SUNSPOT DURING THE FLARE, *by A.N. Babin, A.N. Koval*. The photographic spectral observations of magnetic fields in two umbrae of the sunspot with δ -configuration taken during the 9 August 2011 solar flare of importance 2В/Х6.9 are analyzed. Rapid changes of umbral magnetic fields during the impulsive phase are detected that correlate with the bursts of microwave and hard X-ray emission.

Ключевые слова: Солнце, вспышки, магнитные поля пятен

1 Введение

С тех пор как астрофизики пришли к заключению, что энергия магнитного поля является основным источником, способным обеспечить наблюдаемое во время вспышки выделение энергии, начались интенсивные исследования по установлению связи вспышек со структурой магнитного поля активной области, а также изменений магнитных полей, связанных со вспышками. В Крымской астрофизической обсерватории (КраО) такие исследования были начаты в 1957 г. Велись систематические измерения напряженности магнитных полей пятен и сканирование активных областей с помощью магнитографа.

Такие наблюдения позволили обнаружить (Бумба, 1958; Северный, 1958), что вспышечные ленты располагаются с двух сторон от линии раздела полярностей в местах с большими градиентами магнитного поля, там, где поперечное магнитное поле испытывает значительные изменения направления (Северный, 1958, 1960, 1963, 1964). Эти результаты были подтверждены последующими наблюдениями.

Определение изменений магнитных полей во время вспышек было одной из важных проблем солнечной физики и остается актуальным в настоящее время. Очень важно установить, на какой временной и пространственной шкале происходят изменения магнитных полей во время вспышки. Исследования в этой области можно разделить на несколько этапов в зависимости от временного и пространственного разрешения наблюдений магнитных полей.

Первый этап. Низкое временное разрешение: 1–2 наблюдения магнитных полей в день, полученные за несколько часов до вспышки и через несколько часов после вспышки. Такие наблюдения позволили обнаружить уменьшение напряженности и градиентов магнитного поля после вспышки (Северный, 1963, 1964; Гопасюк и др., 1963; Зверева, Северный, 1970). Низкое временное разрешение наблюдений не позволило сделать однозначный вывод об изменениях магнитных полей: связаны они со вспышками или являются результатом эволюционных изменений магнитных полей активной области.

Второй этап. Повышение временного разрешения измерений магнитных полей до нескольких минут и наблюдения во время вспышек. Наблюдения Раста (1973) с временным разрешением 6 мин, начатые через 30 мин после начала вспышки балла 3В, показали, что в течение полутора часов после начала вспышки продольная составляющая магнитного поля вблизи расположения вспышечных узлов уменьшилась почти в 2 раза. Наблюдения Танаки (1978) с временным разрешением порядка 1 мин позволили обнаружить изменения слабых магнитных полей, которые происходили в течение 15 минут после начала вспышки и после этого закончились. Фотографические наблюдения магнитных полей пятен во время вспышек с временным разрешением 1–7 мин показали, что в пятнах изменялись напряженность магнитного поля, распределение его с высотой, соотношение горячего и холодного компонентов в пятне (Коваль, Степанян, 1983).

Третий этап. Наблюдения магнитных полей во время вспышек с временным разрешением несколько секунд. Анализ измерений магнитных полей во время вспышки класса X5.7, полученных на SOHO/MDI с высоким временным и пространственным разрешением (Косовичев, Жаркова, 2001), обнаружил изменения магнитных полей двух типов: необратимые и импульсные, которые начались через 2 мин после начала вспышки во время всплеска мягкого рентгеновского излучения и продолжались около 30 минут в разных местах активной области. Быстрые импульсные изменения магнитного потока на небольших участках активной области во время вспышек обнаружены также для других вспышек (Лиу и др., 2003; Микленик и др., 2009). Исследование изменения напряженности магнитного поля пятна по фотографическим наблюдениям во время вспышки, полученным с временным разрешением 5–10 сек, показало, что в пятне происходили быстрые изменения напряженности магнитного поля на временной шкале порядка минуты: быстрое уменьшение во время импульсной фазы и последующее восстановление до предвспышечного значения (Бабин, Коваль, 2003).

Суммируя, можно сказать: результаты предыдущих исследований показали, что во время вспышек наблюдаются изменения как слабых, так и сильных магнитных полей активной области, которые происходят на разной временной и пространственной шкале и в разных местах активной области и имеют необратимый и импульсный характер. Но до сих пор эти изменения недостаточно изучены. При наблюдениях с магнитографами всегда возникает вопрос, не являются ли они следствием изменения профиля спектральной линии во время вспышки. При фотографических спектральных наблюдениях, когда измеряется расстояние между компонентами зеемановского расщепления линии в магнитном поле, такая проблема не возникает. Также при наблюдениях с магнитографами измерения магнитных полей пятен не включались.

В данной работе мы представляем результаты анализа фотографических спектральных наблюдений магнитных полей в двух ядрах пятна с δ -конфигурацией (ядра разной полярности в одной полутени), полученных 9 августа 2011 г. во время вспышки балла 2В/X6.9, а также проводим сравнение наблюдаемых изменений напряженности магнитных полей с временным ходом тепловой и нетепловой эмиссии вспышки. Для анализа мы использовали H_{α} -изображения и спектрограммы, полученные на телескопе КГ-2 (КРАО), изображения активной области в континууме и магнитограммы (SDO), наблюдения GOES 1–8 Å и 0.5–4 Å, поток жесткого рентгеновского излучения (RHESSI) и поток микроволнового излучения на частоте 2.85 ГГц (КРАО, Кацивели).

2 Наблюдения и результаты

Вспышка 9 августа 2011 г. (координаты N17,W69), согласно наблюдениям GOES, началась в 7:48 UT, достигла максимума в 8:05 UT и длилась около полутора часов. Одной из особенностей вспышки было излучение в оптическом континууме. Морфология, структура и энергетика белой вспышки, полуэмпирические модели структуры атмосферы, а также природа излучения вспышки изучены в работах (Бабин, Коваль, 2014; Кашапова и др., 2014; Бабин и др., 2015). На рис. 1 представлена фотогелиограмма и магнитограмма активной области 9 августа по наблюдениям SDO, изображение вспышки на щели спектрографа через H_{α} -фильтр по наблюдениям на КГ-2 КраО и поток мягкого рентгеновского излучения ($1-8 \text{ \AA}$ и $0.5-4 \text{ \AA}$, GOES-15).

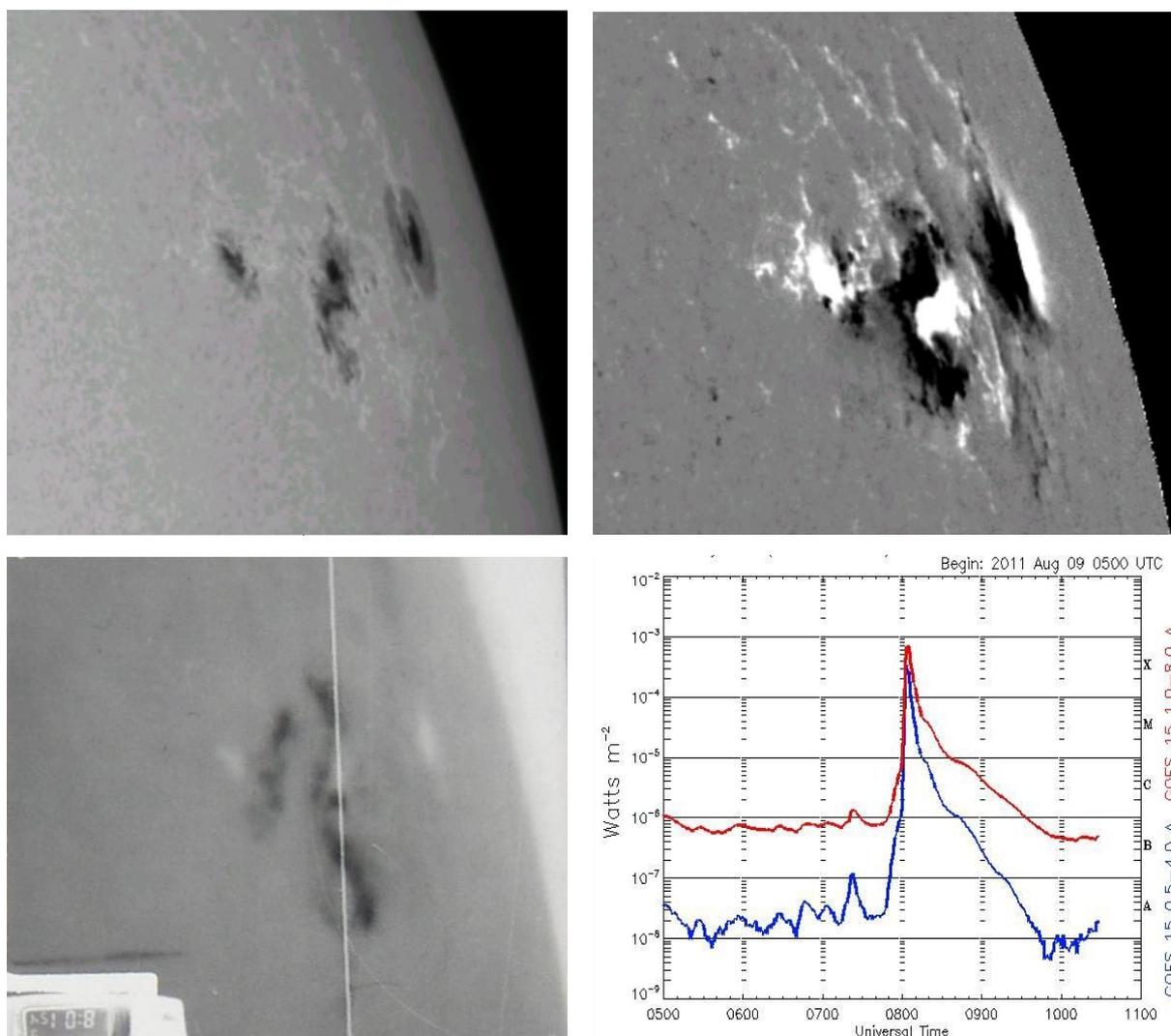


Рис. 1. Фотогелиограмма и магнитограмма активной области NOAA 11263 9.08.2011 в 7:49 UT (SDO, верхний ряд), изображение вспышки в свете H_{α} в 8:02:10 UT (коронаграф КГ-2 КраО, негатив) и поток мягкого рентгеновского излучения ($1-8 \text{ \AA}$ и $0.5-4 \text{ \AA}$, GOES-15), нижний ряд

Активная область имела сложную магнитную структуру, которая образовалась вследствие слияния двух активных областей с образованием в центре мощной δ -конфигурации. Магнитная

ситуация еще более усложнилась 9 августа в связи с выходом новых ядер в δ -пятне вблизи линии раздела полярностей, а также выходом нового магнитного потока к югу от δ -пятна. Вспышка не была классической двухленточной, а имела сложную морфологию с большим количеством ядер, которые разгорались и угасали не одновременно. Наиболее яркие узлы вспышки располагались в области δ -пятна и к югу от него в области выхода нового магнитного потока.

Таблица 1.

$\lambda, \text{Å}$	элемент	$P_n, \text{эВ}$	$P_v, \text{эВ}$	Iфот.	Iпятно	$g\lambda^2 \cdot 10^{10}$
6572.8	Ca I	0.00	1.88	1	6	64.8
6574.2	Fe I	0.99	2.86	1	3	54.03

Спектральные и монохроматические наблюдения вспышки на КГ-2 были начаты в 7:53 UT. Наблюдался спектральный участок 6549–6579 Å с дисперсией 0.58 Å /мм. Временное разрешение наблюдений – 5–30 сек, во время импульсной фазы – 5–10 сек. Щель спектрографа пересекала два ядра противоположной полярности δ -пятна. В наблюдаемом спектральном участке есть несколько магниточувствительных линий. Для измерения магнитных полей были выбраны линии Ca I 6572.8 Å и Fe I 6574.2 Å. Данные об этих линиях приведены в таблице 1. Измерения напряженности магнитного поля по линии кальция несколько затруднены тем, что линия заметно усиливается в пятне и это приводит в некоторых случаях к частичному переналожению компонентов зеемановского расщепления.

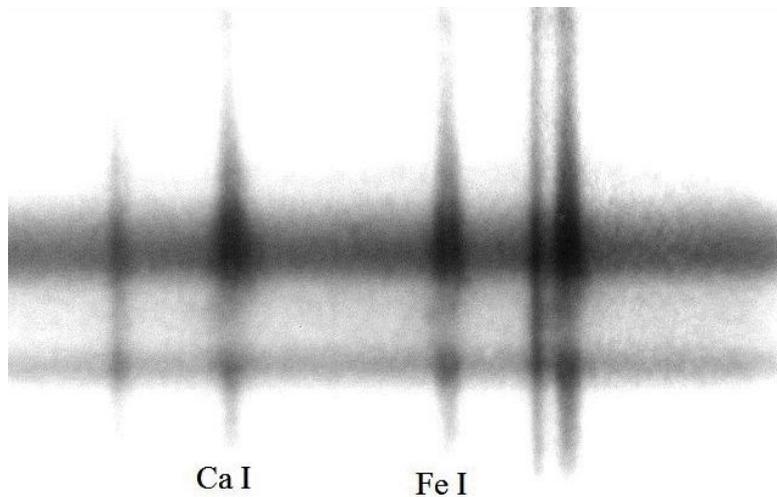


Рис. 2. Спектрограмма исследуемых ядер δ -пятна (позитив) с отмеченными линиями, в которых измерялись магнитные поля

Участок спектрограммы с линиями, по которым проводились измерения магнитных полей, приведен на рис. 2.

Напряженность магнитного поля в ядрах δ -пятна определялась по величине зеемановского расщепления линий и вычислялась по известной формуле:

$$\Delta\lambda = 4.67 \cdot 10^{-5} H g \lambda^2$$

Изменения напряженности магнитных полей...

На рис. 3 приведен ход напряженности магнитного поля со временем в ядре S-полярности (верхняя кривая) и N-полярности (нижняя кривая) δ -пятна по измерениям в линии железа 6574.2 Å. Чтобы уменьшить влияние качества изображений на результаты измерения магнитных полей кривые сглажены скользящим средним по трем измерениям. Высокое временное разрешение наблюдений магнитных полей дает возможность сопоставить изменения напряженности магнитных полей с излучением вспышки в разных энергетических диапазонах. Для сопоставления на рисунке представлены кривая развития в линии H_α вспышечного узла, расположенного между исследуемыми ядрами пятна, поток жесткого рентгеновского и микроволнового излучения.

В микроволновом излучении вспышка имела четко выраженный постепенный компонент, на который накладывались несколько импульсных всплесков разной интенсивности. Временной профиль в полосе 100–300 кэВ (жесткое рентгеновское излучение) показывает отдельные всплески, характерные для нетеплового излучения, которые соответствуют всплескам в микроволновом радиоизлучении. По наблюдениям RHESSI в мягком рентгене (6–12 и 12–25 кэВ, на рисунке не приведены) на фоне сильного постепенного роста потока всплески не заметны.

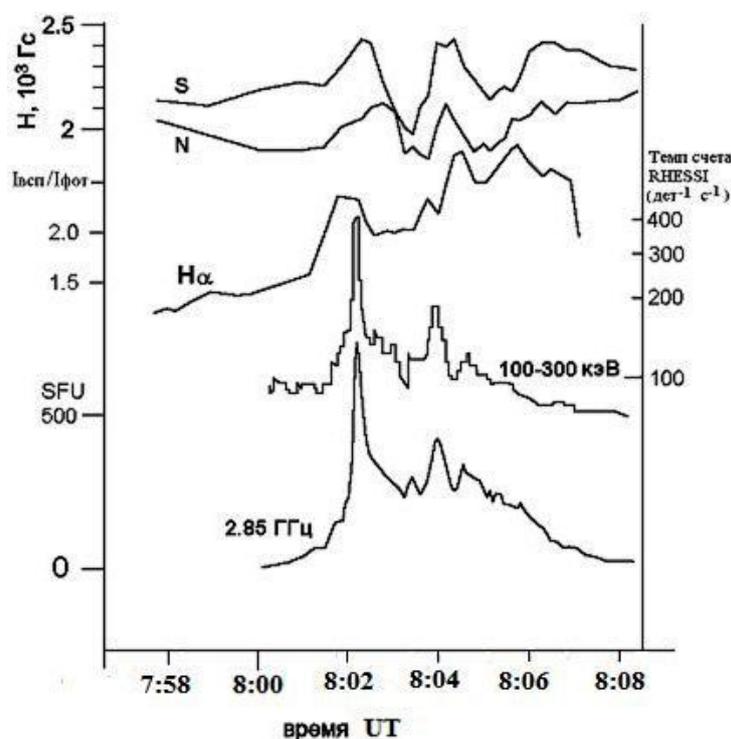


Рис. 3. Сверху вниз: ход напряженности магнитного поля в ядрах δ -пятна, H_α -кривая развития вспышечного узла, расположенного между исследуемыми ядрами, временные профили НХР в канале 100–300 кэВ и микроволновое излучение на частоте 2.85 ГГц

В H_α -излучении вспышечного узла мы также видим постепенный рост яркости в предимпульсной фазе, а затем быстрый подъем интенсивности во время импульсной фазы с несколькими всплесками усиления яркости, совпадающими по времени с импульсными всплесками в микроволновом и рентгеновском излучении.

Изменения напряженности магнитного поля в исследуемых ядрах имели разный характер на разных стадиях развития вспышки. В предимпульсный период (7:57 UT – 8:01 UT) происходило постепенное слабое (порядка 100 Гс) уменьшение напряженности магнитного поля в ядре N-

полярности и столь же постепенное увеличение в ядре S-полярности. В 8:01:30 UT с началом импульсной фазы вспышки начались быстрые импульсные изменения напряженности магнитного поля в обоих ядрах δ -пятна. Величина изменения напряженности магнитного поля достигала 400 Гс. Наблюдается временное совпадение между импульсными изменениями напряженности магнитного поля и импульсными всплесками в жестком рентгеновском и микроволновом излучении.

3 Выводы

По фотографическим спектральным наблюдениям, полученным с высоким временным разрешением, мы исследовали изменения напряженности магнитного поля в двух ядрах δ -пятна во время вспышки балла 2В/Х6.9 и сравнили временной ход изменений напряженности магнитного поля с временным ходом излучения вспышки в рентгеновском и микроволновом диапазоне, а также в линии H_{α} . Полученные результаты показывают наличие существенных изменений напряженности магнитного поля в ядрах пятна, которые имеют разный характер в предимпульсной и импульсной фазе вспышки. Наблюдается временное совпадение между наблюдаемыми импульсными изменениями напряженности магнитного поля и нетепловой эмиссией вспышки. В связи с влиянием качества изображений на результаты измерения магнитных полей и, возможно, недостаточное временное разрешение мы не рассматриваем их детальное временное сопоставление. Однако можно утверждать, что импульсное усиление в радиоизлучении и жестком рентгене сопровождалось импульсными изменениями напряженности магнитного поля в исследуемых ядрах δ -пятна. Возможность отнести изменения напряженности магнитных полей за счет изменений профилей линий вследствие вспышечной эмиссии в нашем случае исключается. Для подтверждения результатов требуются дальнейшие высококачественные наблюдения с высоким временным и пространственным разрешением.

Литература

- Бабин А.Н., Коваль А.Н. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2003. Т. 99. С. 86.
 Бабин А.Н., Барановский Э.А., Коваль А.Н. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2015. Т. 111. № 1, С. 5.
 Бабин, Коваль (Babin A.N. and Koval A.N.) // Bull. Crim. Astrophys. Obs. 2014. Т. 110. С. 100.
 Бумба В. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1958. Т. 19. С. 105.
 Гопасюк С.И., Огирь М.Б., Северный А.Б., Шапошникова Е.Ф. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1963. Т. 29. С. 15.
 Зверева А.М., Северный А.Б. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1970. Т. 41–42. С. 97.
 Кашапова Л.К., Мешалкина Н.С., Бабин А.Н., Коваль А.Н., Цап Ю.Т. // Труды Всероссийской ежегодной конференции с международным участием по физике Солнца “Солнечная и солнечно-земная физика – 2014”. С.-П. Гл. астрон. обс. РАН. 2014. С. 211.
 Коваль А.Н., Степанян Н.Н. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1983. Т. 68. С. 3.
 Косовичев и Жаркова (Kosovichev A.G. and Zharkova V.V.) // Astrophys. J. 2001. V. 550. L. 105.
 Лиу и др. (Liu Y., Jiang Y.C., Ji H.S., Zang H.Q., Wang H.N.) // Astrophys. J. 2003. V. 593. L. 137.
 Микленик и др. (Miklenic C.H., Veronig A.M., and Vrsnak B.) // Astron. Astrophys. 2009. V. 499. P. 893.
 Раств (Rust D.M.) // Solar Phys. 1973. V. 33. P. 205.
 Северный А.Б. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1958. Т. 20. С. 22.
 Северный А.Б. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1960. Т. 22. С. 12.
 Северный А.Б. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1963. Т. 30. С. 161.
 Северный А.Б. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1964. Т. 31. С. 159.
 Танака (Tanaka K.) // Solar Phys. 1978. V. 58. P. 149.