

УДК 523.98

## Быстрые изменения магнитных полей пятен во время вспышек

*А.Н. Бабин, А.Н. Коваль*

Крымская астрофизическая обсерватория, 98409, Украина, Крым, Научный

Поступила в редакцию 17 июля 2003 г.

**Аннотация.** Анализ фотографических спектральных наблюдений магнитных полей пятен во время вспышек балла 2В/М2.3 и 1F/C7 26.06.1999 г., полученных с временным разрешением около 10 секунд, позволил обнаружить быстрые изменения магнитного поля на временной шкале порядка минуты. Эти изменения проявлялись в быстром уменьшении магнитного поля пятна во время импульсной фазы вспышки и последующего восстановления его напряженности до предвспышечного значения.

RAPID VARIATIONS OF THE SUNSPOT MAGNETIC FIELDS DURING FLARES, *by A.N.Babin and A.N.Koval.* Polarized spectral photographic observations of sunspot magnetic fields with temporal resolutions about 10 second during two flares of importances 2B/M2.3 and 1F/C7 were studied. Analyses of the observations revealed rapid variations of the magnetic fields on the scale of one minute. During impulsive phase of flares the strength of magnetic fields showed fast decreasing and then gradually restoring to the preflare value.

**Ключевые слова:** Солнце, вспышки, магнитные поля пятен

---

## 1 Введение

После того как многочисленные исследования вспышек и других нестационарных явлений на Солнце привели к заключению, что реализация свободной энергии магнитного поля в нижней короне является основным источником, способным обеспечить наблюдаемое во вспышках выделение энергии, задача исследования изменений магнитных полей, связанных со вспышками, приобрела особую актуальность. Чтобы определить, каким образом происходит накопление и реализация магнитной энергии, нужно знать, на какой временной и пространственной шкале наблюдаются изменения магнитных полей активной области.

Исследованию изменений фотосферных магнитных полей, связанных со вспышками, было посвящено много работ, однако результаты их были противоречивы. По измерениям магнитных полей, выполненных с магнитографом в Крымской астрофизической обсерватории (Северный, 1964, 1965; Зверева, Северный, 1970; Гопасюк и др., 1963; Гопасюк, Огирь, Цап, 1963) было обнаружено уменьшение напряженности и градиентов магнитного поля и упрощение его структуры после вспышки. Другие исследователи (например, Говард, Бэбкок, 1960) не находили таких изменений. Причиной такого несоответствия являлось низкое временное и пространственное разрешение получаемых измерений магнитных полей (часто сравнивались наблюдения, полученные за несколько часов до

вспышки и через несколько часов после нее) и ограниченная чувствительность магнитографов (Говард, Северный, 1963).

Наблюдения с низким временным разрешением (1 – 2 измерений в день) не позволяли сделать однозначный вывод о том, связаны ли наблюдаемые изменения магнитных полей со вспышками, или же они являются результатом эволюционных изменений магнитных полей активной области. Проанализировав наблюдательные данные, Раст (1976) пришел к выводу, что скорость изменения напряженности магнитного поля пятен не различается при наличии или отсутствии вспышек в активной области, исключая случаи больших протонных вспышек.

Повышение временного разрешения при измерениях как слабых, так и сильных магнитных полей, а также получение наблюдений во время вспышек позволили обнаружить как постепенные, так и быстрые кратковременные изменения магнитных полей. Измерения магнитных полей пятен во время вспышки балла 3В (Раст, 1973) с временным разрешением 6 минут, начатые через 30 минут после начала вспышки, показали, что в течение полутора часов после начала вспышки продольная составляющая фотосферных магнитных полей вблизи расположения вспышечных узлов уменьшилась почти в два раза. Наблюдения Танаки (1977) с временным разрешением порядка 1 минуты позволили обнаружить быстрые изменения слабых магнитных полей во время вспышки балла 2В, которые происходили в течение 15 минут после начала вспышки и после этого закончились.

Очень быстрые изменения (уменьшение) магнитных полей в течение 10 – 15 минут от начала вспышки 3В/X5.7 обнаружены Косовичевым и Жарковой (2001) при анализе MDI наблюдений на SOHO. При этом в одних местах активной области эти изменения носили необратимый характер, а в других - импульсный (временный), продолжительностью несколько минут, после чего напряженность магнитного поля возвращалась к первоначальному значению. Однако следует заметить, что при наблюдениях с магнитографами всегда возникает вопрос, не являются ли обнаруженные изменения магнитного поля следствием изменения профиля спектральной линии во время вспышки. В то же время при фотографических спектральных наблюдениях, когда регистрируется картина зеemannовского расщепления линии в присутствии магнитного поля и измеряется расстояние между ее компонентами, такая проблема не возникает.

Фотографические наблюдения магнитных полей пятен во время двух вспышек с временным разрешением 1 – 5 минут, охватывающие весь период развития вспышки, провели Коваль и Степанян (1983). Они показали, что в пятнах происходили существенные изменения магнитных полей. Изменялись напряженность поля, распределение его с высотой, а также соотношение горячего и холодного компонентов в пятне. В момент, близкий к максимуму импульсного всплеска, произошло быстрое изменение наклона силовых трубок магнитного поля, которые к концу вспышки вернулись к первоначальному положению.

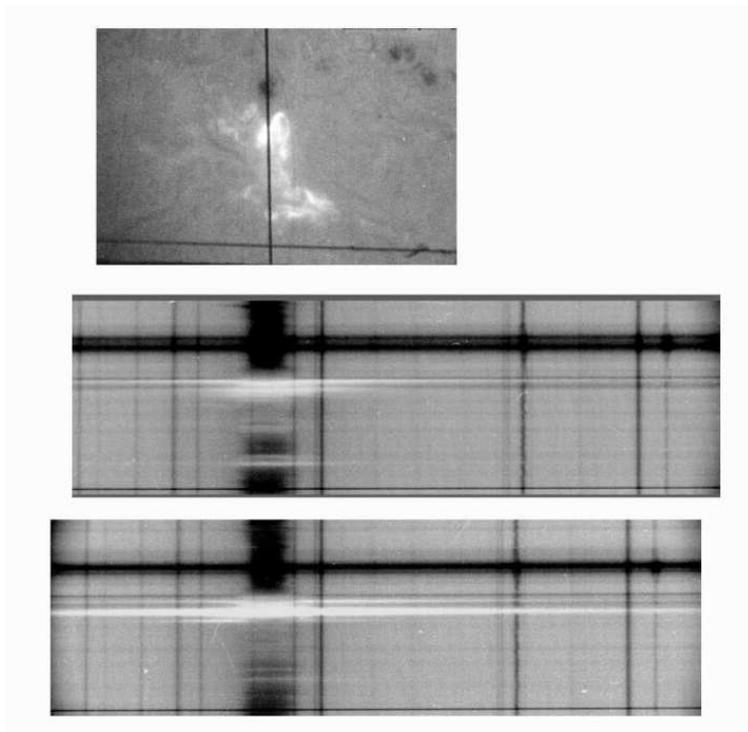
Быстрые динамические явления, наблюдавшиеся непосредственно перед и во время вспышки, были отмечены также Шмидер и др. (1994). Так, в области вспышки 6 июня 1991 г. за 4 минуты до ее начала магнитная конфигурация была примерно потенциальной, затем в течение 30 минут во время вспышки поперечное поле приобрело непотенциальную конфигурацию: произошел поворот вектора поля на 30 – 40 градусов.

Из вышеизложенного краткого обзора результатов предыдущих исследований следует, что для выяснения характера изменений магнитного поля во время вспышки необходимо повышение временного и пространственного разрешения наблюдений магнитных полей и покрытие всего периода развития вспышки.

Здесь мы анализируем фотографические наблюдения магнитных полей, полученные во время двух вспышек 26 июня 1999 года с временным разрешением около 10 секунд и пространственным – около 1 угловой секунды.

## 2 Наблюдения и результаты

Спектральные наблюдения активной области NOAA 8598 с анализаторами линейной поляризации были начаты в 05:01 UT на коронографе КГ-2 Крымской астрофизической обсерватории (КрАО).



**Рис. 1.** Фильтрограмма вспышки в 05:11:49 UT, вертикальная линия – щель спектрографа, горизонтальная – реперная нить (север внизу, восток справа), рядом – одновременно полученная спектрограмма, ниже спектрограмма в 05:11:57 (щель несколько западнее)

Использовалась методика, аналогичная описанной Бабиным и Коваль (1987). Анализаторы линейной поляризации (двупреломляющие призмы из исландского шпата и стекла, каждая из которых давала два ортогонально поляризованных пучка) располагались вблизи фокальной плоскости спектрографа, где одновременно фокусировались спектры II и III порядка. Оси призмы, работающей в III порядке (дисперсия 0.058 нм/мм) составляли угол  $\pm 45^\circ$  с направлением щели спектрографа, а работающей во II порядке  $0$  и  $90^\circ$ . В результате за одну экспозицию получаем четыре поляризационных спектрограммы одного и того же участка Солнца при четырех положениях осей анализатора линейной поляризации, различающихся на  $45^\circ$ . Участок спектра протяженностью около 2.0 нм в области линии H $\alpha$  снимался на аэрофотопленку тип 42 с экспозициями 0.15 сек. Одновременно с помощью камеры РФК-5 и H $\alpha$  фильтра регистрировалось изображение на щели спектрографа.

Обе вспышки 26.06.1999 г. произошли вблизи лидирующего пятна активной области NOAA 8598 в том месте, где 25 – 26 июня наблюдался выход нового магнитного потока. NOAA 8598 являлась частью мощного активного комплекса, состоящего из нескольких активных областей, которые находились на разной стадии развития. Ее лидер в это время располагался вблизи центрального меридиана. Согласно Solar Geophysical Data (1999) вспышка оптического балла 2В (рентгеновский класс M 2.3), координаты N24, E02 началась в 05:06 UT и достигла максимума в 05:12 UT. Вспышка относилась к классу компактных и вблизи максимума импульсного всплеска дала эмиссию в непрерывном спектре (контраст ее в области 658.0 нм составлял около 15%). Фотография вспышки вблизи максимума приведена на рис. 1.

Нашей задачей было исследование линейной поляризации излучения вспышек. Однако при получении спектрограмм наиболее яркого вспышечного узла щель спектрографа пересекала лидирующее пятно активной области NOAA 8598, что позволило измерить магнитные поля в пятне и проанализировать их изменения во время вспышки. Спектрограммы получены с временным раз-

решением 5 – 10 секунд. Согласно визуальным наблюдениям магнитных полей пятен в КРАО на телескопе БСТ-2, лидер представлял собой пятно, в полутени которого располагались несколько ядер одной полярности. Щель спектрографа одновременно пересекала два ядра. Магнитное поле в лидере было преимущественно поперечным, так как на спектрограммах, полученных в III порядке спектра, четко видны два  $\sigma$ -компонента в одной поляризации и  $\pi$ -компонент в ортогональной. При этом направление вектора поперечного магнитного поля в северном ядре пятна и прилегающей полутени отличалось от направления вектора в южном ядре и прилегающей полутени на  $90^\circ$ . Измерения магнитного поля проводились на внешней границе ядро – полутень.

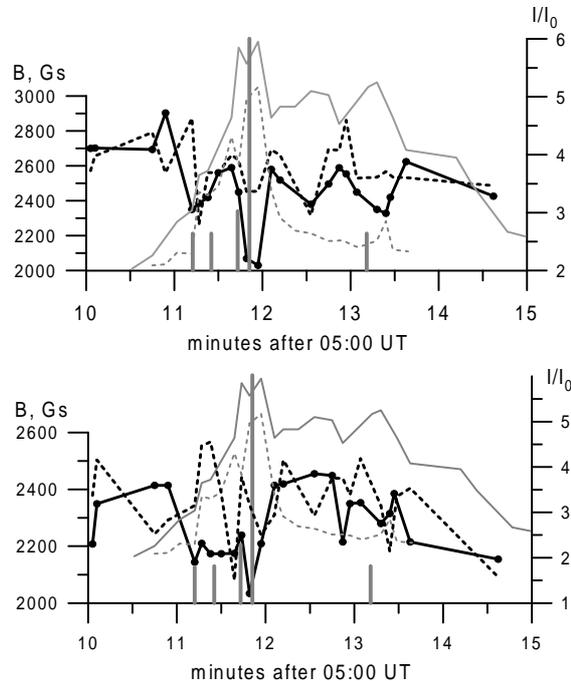
Для измерений магнитных полей использовались линии FeI  $\lambda 656.923$  nm и CaI  $\lambda 657.280$  nm. Данные об этих линиях приведены в таблице.

Таблица 1.

$\lambda$ , nm	Elem.	$P_{low}$ , eV	$P_{up}$ , eV	$I_{ph}$	$I_{sp}$	$g\lambda^2 10^{10}$	$h$ , km
656.923	FeI	4.71	6.59	4	3	59.3	179
657.280	CaI	0.00	1.88	1	6	64.8	300

Результаты измерений магнитных полей в северном и южном ядре приведены на рис. 2. Из этого рисунка видно, что напряженность магнитного поля пятна во время вспышки испытывает нерегулярные изменения, которые выходят за пределы ошибок измерений (около 80 Gs).

Чтобы выяснить, в какой временной зависимости находятся изменения напряженности магнитных полей с развитием вспышки, мы построили кривые яркости основных вспышечных узлов, две из которых представлены на рис. 2. Интенсивности выражены в единицах соседней невозмущенной



**Рис. 2.** Напряженность магнитного поля  $B$  (сплошная жирная кривая – по линии FeI, жирная штриховая – по линии CaI) в южном (наверху) и северном (внизу) ядрах пятна и яркость двух вспышечных узлов  $I/I_0$  (тонкая сплошная и тонкая штриховая) как функции времени

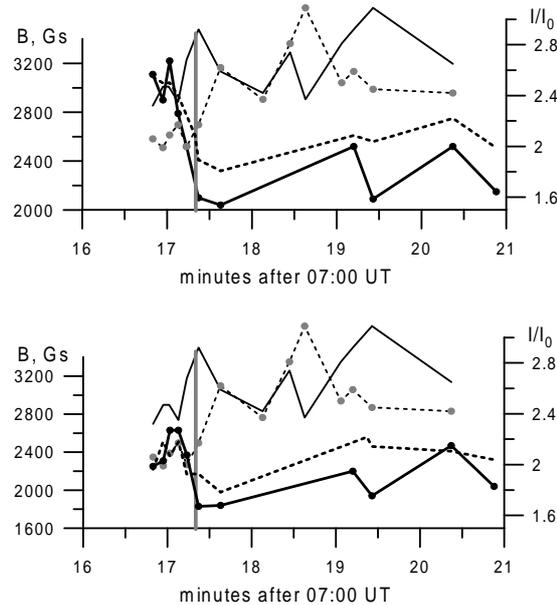


Рис. 3. То же, что на рис. 2, но для вспышки 1F/C7 (обозначения те же)

хромосферы в той же полосе пропускания фильтра, центрированной на линию  $H\alpha$ . Вертикальной чертой отмечены моменты максимумов микроволновых импульсных всплесков на частоте 2950 МГц по наблюдениям станции Зименки (Нижний Новгород).

Сравнение временного хода напряженности магнитного поля с кривыми развития основных вспышечных узлов показывает, что наибольшее падение напряженности магнитного поля происходит во время импульсного роста яркости вспышечных узлов и микроволнового радиоизлучения. Затем напряженность магнитного поля довольно быстро восстанавливается до первоначальных значений, а затем при повторных увеличениях яркости вспышечных узлов снова уменьшается. К сожалению, наблюдения конечного периода вспышки были прерваны из-за облаков.

Наблюдения были возобновлены в 7:15 UT, когда в этой же активной области разгоралась новая вспышка. Согласно Solar Geophysical Data (1999), вспышка оптического балла 1F, рентгеновский класс C7, координаты N25, E00 началась в 6:50 UT и достигла максимума в 7:23 UT, максимум микроволнового радиоизлучения вспышки наблюдался в 7:17.0 – 7:18.0. Временной ход яркости двух вспышечных узлов показан на рис.3. Вертикальной чертой отмечен момент максимума жесткого рентгеновского излучения по данным Yohkoh. Вспышка разгоралась медленно, и только в 7:16 UT начался довольно быстрый рост яркости, который по времени совпал с началом микроволнового всплеска. На кривых развития вспышки в  $H\alpha$  видно, что наблюдались повторные возгорания узлов.

Измерения магнитных полей пятен во время этой вспышки получены с худшим временным разрешением, чем для предыдущей, так как фотографировались разные вспышечные узлы, и щель спектрографа не при каждой экспозиции пересекала лидирующее пятно. Все же наблюдения охватывают период начала, максимума и спада микроволнового всплеска. Временной ход напряженности магнитного поля в двух ядрах лидирующего пятна совершенно синхронен и представлен на рис. 3. Из рисунка видно, что, как и в случае вспышки балла 2B, к моменту максимума микроволнового всплеска наблюдается очень резкое уменьшение напряженности магнитного поля по измерениям в обеих линиях. В более поздний период мы имеем только три измерения напряженности магнитного поля. Они указывают на то, что поле начинает восстанавливаться. Падение напряженности поля в 7:19:26 UT соответствует повторному возгоранию двух вспышечных узлов.

### 3 Обсуждение результатов

Исследование изменений напряженности магнитного поля пятна по фотографическим наблюдениям с временным разрешением около 10 секунд показало, что во время вспышки в пятне происходили очень быстрые (на временной шкале порядка минуты) изменения напряженности магнитного поля. Картина изменений следующая. Наибольшее уменьшение напряженности поля совпадает по времени с максимумом микроволнового всплеска и импульсного подъема интенсивности в  $H\alpha$ . Затем поле начинает восстанавливаться. Повторное возгорание вспыхивающих узлов соответствует по времени повторным падениям напряженности магнитного поля.

Следует отметить, что вспышки развивались вне исследуемого нами пятна. Ближайший узел вспышки располагался в области выхода нового магнитного потока на расстоянии нескольких десятков угловых секунд от пятна. В исследуемых местах пятна не наблюдалось никаких видов  $H\alpha$  активности. К сожалению, протяженные крылья эмиссии в линии  $H\alpha$  и малый размер пор не позволили нам определить изменения магнитного поля в местах выхода нового магнитного потока.

Наши результаты согласуются с результатами Косовичева и Жарковой (2001), которые обнаружили импульсные изменения магнитных полей во время вспышки 14 июля 2000 года. Это согласие можно рассматривать как аргумент в пользу того, что в указанном исследовании наблюдались действительные изменения напряженности магнитных полей, а не быстрые изменения профилей спектральной линии во время вспышки. Для выяснения природы этого интересного явления необходимы специально поставленные наблюдения магнитных полей активных областей в широком спектральном диапазоне с высоким временным и пространственным разрешением.

Авторы выражают благодарность сотрудникам НИРФИ (Нижний Новгород) за предоставление копий записей микроволнового радиоизлучения 2950 МГц для вспышки 2В/М2.3.

### Литература

- Бабин А.Н., Коваль А.Н. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1987. Т. 77. С. 9.  
Говард и Бэбкок (Howard R. & Babcock H.W.) // *Astrophys. J.* 1960. V. 132. P. 218.  
Говард и Северный (Howard R. & Severny A.B.) // *Astrophys. J.* 1963. V. 137. P. 1242.  
Гопасюк С.И., Огирь М.Б., Северный А.Б., Шапошникова Е.Ф. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1963. Т. 29. С. 15.  
Гопасюк С.И., Огирь М.Б., Цап Т.Т. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1963. Т. 30. С. 148.  
Зверева А.М., Северный А.Б. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1970. Т. 41-42. С. 97.  
Коваль А.Н., Степанян Н.Н. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1983. Т. 68. С. 3.  
Косовичев и Жаркова (Kosovichev A.G. & Zharkova V.V.) // *Astrophys. J.* 2001. V. 550. L. 105.  
Раст (Rust D.) // *Solar Phys.* 1973. V. 33. P. 205.  
Раст (Rust D.) // *Solar Phys.* 1976. V. 47. P. 21.  
Северный А.Б. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1964. Т. 31. С. 126; 1965. Т. 33. С. 3.  
Танакэ (Tanaka K.) // *Solar Phys.* 1978. V. 58. P. 149.  
Шмидер и др. (Schmieder B., Hagyard M.J., Ai G., Zhang H., Kalman B., Gyori L., Rompolt B., Demoulin P. and Machado M.E.) // *Solar Phys.* 1994. V. 150. P. 199.  
*Solar Geophysical Data.* 1999. N. 664. Pt. 2.