

МАГНИТНЫЕ ТРАНЗИЕНТЫ ВО ВРЕМЯ ВСПЫШЕК 9 МАЯ 2012г. В NOAA 11476 И 4 ИЮЛЯ 2012г. В NOAA 11515

О.С.ГОПАСЮК

Поступила 7 декабря 2017

Принята к печати 7 марта 2018

Проведены исследования изменений продольного магнитного поля в NOAA 11476 и NOAA 11515 во время вспышек M-класса. Наблюдения магнитного поля были получены Solar Dynamics Observatory с инструментом Helioseismic and Magnetic Imager (SDO/HMI) с временным и пространственным разрешением 45 с и 0".5 пиксел², соответственно. Во время максимальной фазы вспышек M5.7/2B 9 мая 2012г. в NOAA 11476 и M5.3/2B 4 июля 2012г. в NOAA 11515 в магнитном поле активных областей произошли резкие изменения. В сильных магнитных полях отрицательной полярности возникли транзиентные структуры с обратным знаком. Транзиенты располагались в тени пятен и существовали в течение нескольких минут. Мы детально исследуем эти особенности магнитного поля.

Ключевые слова: *Солнце: активность: вспышки: магнитные поля*

1. *Введение.* Во время вспышек X- и M-класса происходит существенное изменение фотосферного магнитного поля (см., например, [1-11]). Наблюдения показывают два вида изменений. Первый вид, это необратимые изменения измеренного магнитного поля от состояния перед вспышкой до состояния после вспышки [4,6,12-14]. Такие изменения обычно наблюдаются в виде появления или исчезновения магнитного потока и рассматриваются как реальные изменения магнитного поля. Анализ таких изменений продольного магнитного поля, проведенный для некоторых вспышек X- и M-класса показал, что в этом случае средняя продолжительность изменений составляет около 15 мин, средняя величина изменения магнитного поля - 69 Гс [7,8]. Второй вид, изменения, происходящие только во время вспышки, так называемые "транзиенты" или "магнитные аномалии". При этом измеренные магнитные поля возобновляют свое предвспышечное состояние после события [1,5,10,15]. Общеизвестно, что измерения магнитных полей во время вспышек значительно искажены. Искажения могут быть вызваны либо необычными условиями вспышечной атмосферы, такими как движение или нагрев, которые сильно изменяют профиль линии, либо инструментальными проблемами - насыщение (нелинейность в реакции инструмента на сильные магнитные поля), рассеянный свет (который может доминировать в темных областях

солнечного пятна). Оба эффекта приведут к тому, что измеренное магнитное поле будет намного слабее, чем фактическая напряженность поля. В некоторых крайних случаях магнитная аномалия принимает форму обращения знака, т.е. измеренные магнитные поля временно меняют свои полярности на противоположные.

В этой статье мы исследуем пространственные и временные взаимосвязи между аномальными изменениями продольного магнитного поля во время двух вспышек М-класса, полученными с SDO/HMI, с различными аспектами вспышки.

2. Данные наблюдений. Нами были использованы данные космических инструментов HMI [16], установленного на борту SDO, и GOES [17], а также данные наземных обсерваторий Kanzelhoehe Solar Observatory¹ (KSO) и входящих в Global Oscillation Network Group² (GONG), Udaipur Solar Observatory (USO) и Mauna Loa Solar Observatory (MLSO).

SDO/HMI получает изображения в континууме, магнитограммы продольного поля и доплерограммы полного диска Солнца в фотосферной линии поглощения FeI 6173.3 Å с пространственным и временным разрешением 0".5 пиксел⁻¹ и 45 с, соответственно. Магнитограммы, доплерограммы и изображения в континууме активных областей получены на SDO/HMI во время вспышек M5.7/2B в NOAA 11476 10 мая 2012г. и M5.3/2B в NOAA 11515 4 июля 2012г. Эти наблюдения предоставляют информацию о временной и пространственной эволюции фотосферных магнитных полей, движений плазмы и интенсивностей в активных областях.

Для определения местоположения вспышки были использованы наземные хромосферные H α наблюдения, полученные солнечными обсерваториями KSO, USO и MLSO. Пространственное разрешение этих данных ~1" пиксель⁻¹. Для вспышки M5.7/2B 10 мая 2012г. были использованы данные USO и MLSO, для вспышки M5.3/2B 4 июля 2012г. - данные KSO. H α изображения активных областей были совмещены с HMI магнитограммами, доплерограммами и изображениями активных областей в континууме.

3. Анализ данных наблюдений. За время прохождения по диску Солнца активные области (АО) NOAA 11476 и NOAA 11515 показали высокую вспышечную активность. 10 мая 2012г. в активной области NOAA 11476 произошло 17 вспышек С- и М-класса. АО находилась в южном полушарии, на момент вспышки M5.7/2B ее координаты были N13E22. В активной области NOAA 11515 4 июля 2012г. произошло 15 вспышек С- и М-класса.

¹ <http://www.kso.ac.at>

² <https://gong2.nso.edu>

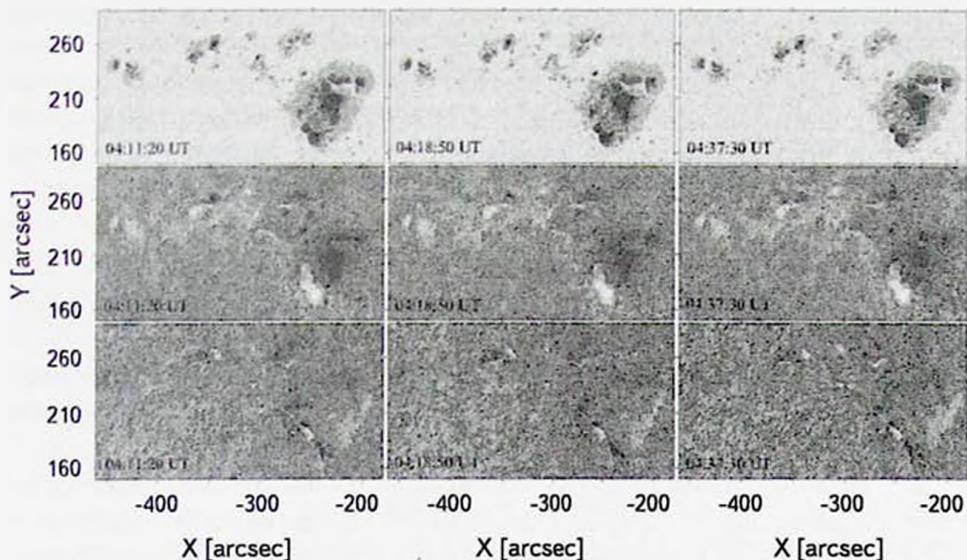


Рис. 1. Изображения в континууме (верхняя панель), магнитограммы (центральная панель) и доплерограммы (нижняя панель) активной области NOAA 11476, полученные на SDO/HMI 10 мая 2012г. в начале импульсной фазы (04:11:20 UT), во время максимальной фазы (04:18:50 UT) и на фазе спада (04:37:30 UT) вспышки M5.7/2B.

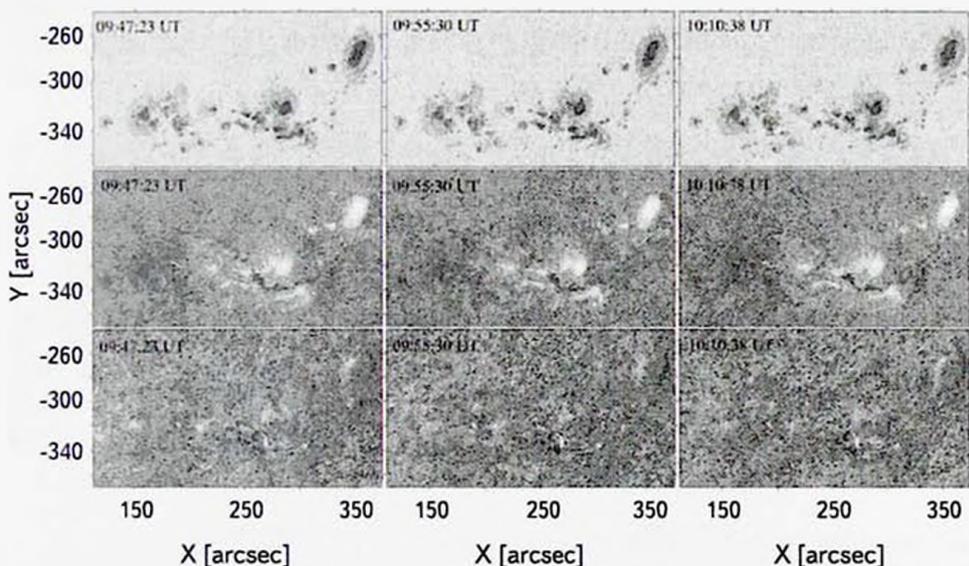


Рис. 2. Изображения в континууме (верхняя панель), магнитограммы (центральная панель) и доплерограммы (нижняя панель) активной области NOAA 11515, полученные на SDO/HMI 4 июля 2012г. в начале импульсной фазы (09:47:23 UT), во время максимальной фазы (09:55:30 UT) и на фазе спада (10:10:38 UT) вспышки M5.3/2B.

АО находилась в северном полушарии, во время вспышки M5.3/2B ее координаты были S16W18.

На рис.1 и рис.2 представлены магнитограммы, доплеровграммы и изображения в континууме активных областей NOAA 11476 и NOAA 11515, полученные на SDO/HMI во время вспышек M5.7/2B 10 мая 2012г. и M5.3/2B 4 июля 2012г., соответственно. Данные рис.1 и рис.2 относятся к разным фазам вспышки - импульсной, максимальной и фазе спада вспышки.

В обеих активных областях во время максимальной фазы вспышки в тени пятен в сильных магнитных полях отрицательной полярности наблюдалась инверсия знака поля - область сильных полей положительной полярности (магнитный транзиент или магнитная аномалия). В NOAA 11476 транзиент наблюдался в тени пятна простой конфигурации, в то время как в NOAA 11515 - в тени пятна дельта конфигурации.

Для обеих активных областей был исследован магнитный поток вдоль горизонтальной линии АВ (рис.3, верхняя панель) во время импульсной и максимальной фазы вспышки. Линия АВ была выбрана путем построения профилей магнитного потока вдоль горизонтального раскра, движущегося снизу вверх выбранных магнитограмм.

Изменения магнитного потока вдоль линии АВ для NOAA 11476/NOAA 11515 показаны на нижней панели рис.3, где пунктирные и сплошная кривые представляют магнитный поток во время импульсной (04:11:20/09:47:23 UT) и максимальной (04:18:50 UT/09:55:30 UT) фазы вспышек, соответственно. Профили магнитного потока перед вспышкой и во время ее максимальной

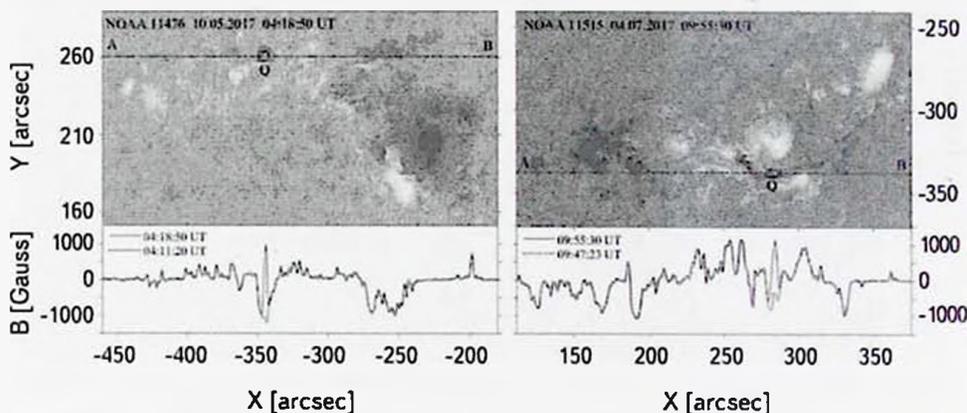


Рис.3. HMI магнитограммы активных областей NOAA 11476 и NOAA 11515 во время максимальной фазы вспышек M5.7/2B и M5.3/2B, соответственно (верхняя панель). На нижней панели соответствующий магнитный поток вдоль линии АВ во время импульсной (пунктирная кривая) и максимальной фазы вспышки (сплошная кривая). Прямоугольником "Q" показана область магнитной аномалии.

фазы совпали во всех точках вдоль АВ, за исключением области "Q", что дает четкие доказательства аномального изменения знака полярности в магнитном потоке в области "Q" во время максимальной фазы. В обоих случаях в области аномалии напряженность магнитного поля менялась от ~ -1000 Гс (во время импульсной фазы) до $+1000$ Гс (во время максимальной фазы вспышки).

Чтобы изучить вариации магнитного потока аномалии со временем мы построили пространственно-временные карты магнитного потока в активных областях вдоль линии АВ, указанной на рис.3. Временной промежуток включает периоды времени 04:00:05 UT - 04:37:30 UT для вспышки M5.7/2B (NOAA 11476) и 09:35:23 UT - 10:10:38 UT для вспышки M5.3/2B (NOAA 11515). Созданные таким образом пространственно-временные карты для обеих активных областей представлены на рис.4 (верхняя панель). По осям X и Y отложены время и долгота наблюдаемого магнитного потока вдоль линии АВ, соответственно. Эти карты показывают четкую структуру аномалий в магнитном поле вдоль линии АВ. Таким же образом были построены пространственно-временные карты интенсивностей АО в линии $H\alpha$. Соответствующие значения $H\alpha$ вспышечных интенсивностей на рис.4 нанесены белыми сплошными линиями. В обоих случаях магнитная аномалия располагалась в узле вспышки и сохраняла свое местоположение со временем. Следует отметить, что площадь, занимаемая транзитом, существенно меньше площади узла вспышки в линии $H\alpha$.

Временные изменения магнитного потока вдоль линии LM показаны

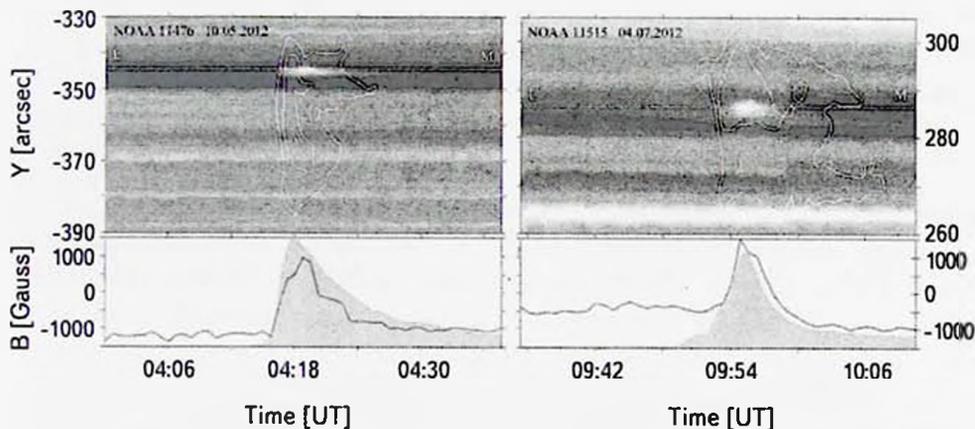


Рис.4. Верхняя панель - пространственно-временные карты магнитного потока активных областей NOAA 11476 и NOAA 11515 вдоль линии АВ (рис.3) в области магнитной аномалии с соответствующими $H\alpha$ вспышечными контурами (белые сплошные кривые). Нижняя панель - временные вариации магнитного потока вдоль линии LM (сплошная кривая) и интегрального потока излучения в мягком рентгене по данным GOES-15 в диапазоне 1.0-8.0 Å (закрашенный профиль) в NOAA 11476 и NOAA 11515.

сплошными кривыми на рис.4 (нижняя панель). Закрашенным контуром представлен интегральный поток мягкого рентгеновского излучения, полученный на GOES-15 в диапазоне 1-8 Å. Рентгеновское излучение начинает расти на 1-2 мин раньше магнитного потока. Максимум напряженности поля в магнитной аномалии NOAA 11476 наступает на 2 мин позже максимума рентгеновского излучения. В NOAA 11515 напряженность в магнитной аномалии достигает своего максимального значения практически одновременно с максимумом рентгеновского излучения. К моменту окончания вспышки профили магнитного потока в обеих активных областях возвращаются к своему до вспышечному уровню. Все это позволяет предпологать, что инверсия магнитной полярности в обеих АО была вызвана вспышкой.

Во время максимальной фазы вспышек наблюдались вариации магнитного поля в области "Q", отражающие изменения напряженности существующих магнитных полей. На верхней панели рис.5 показаны среднеквадратичные

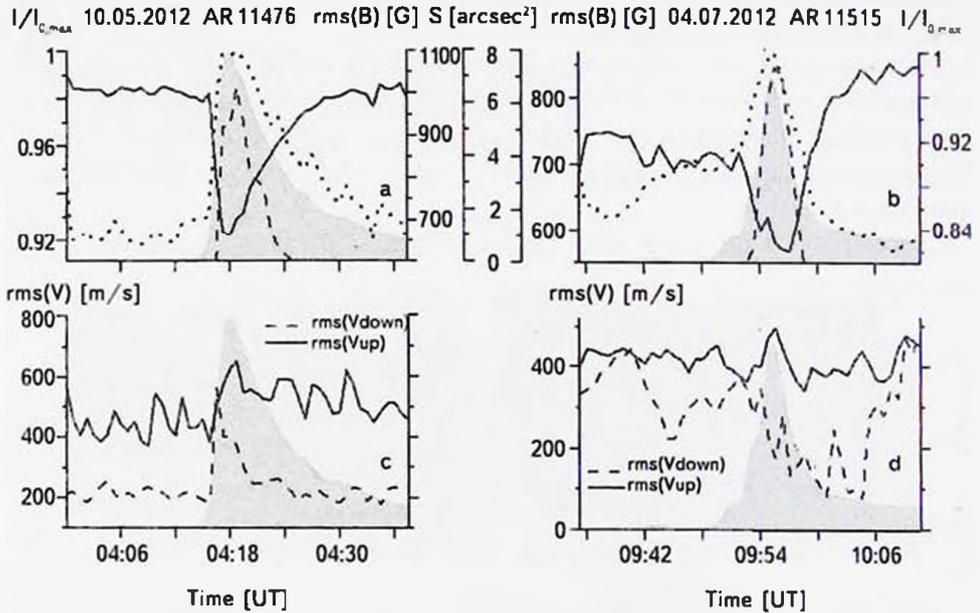


Рис.5. Верхняя панель - временные вариации rms магнитного поля, $\langle B^2 \rangle^{1/2}$ (сплошная кривая), средней относительной интенсивности в фотосферной линии, $I/I_{0,max}$ (пунктирная кривая), площади магнитной аномалии, S (штриховая кривая), в области "Q" активных областей NOAA 11476 и NOAA 11515 и соответствующего интегрального потока мягкого рентгеновского излучения в диапазоне 1-8 Å по GOES-15 (закрашенный профиль). На соответствующих нижних панелях временные вариации rms лучевых скоростей нисходящих, Vdown (штриховая кривая), и восходящих, Vup (сплошная кривая), потоков плазмы в области "Q" активных областей NOAA 11476 и NOAA 11515 и соответствующего интегрального потока мягкого рентгеновского излучения в диапазоне 1-8 Å по GOES-15 (закрашенный профиль).

значения магнитного поля $\langle B^2 \rangle^{1/2}$ в областях магнитных аномалий как функция времени и соответствующие изменения площади магнитной аномалии S , средней относительной интенсивности в фотосферной линии $I/I_{\text{полн}}$ и потока мягкого рентгеновского излучения в диапазоне 1-8 А, полученного на GOES-15.

Напряженность поля постоянна с разными значениями до и после вспышки. Существенные изменения магнитного поля происходили только вблизи максимума рентгеновского излучения. Эти изменения происходили в тени пятен отрицательной полярности и сопровождалась импульсным увеличением средней интенсивности. Для NOAA 11476 интенсивность увеличилась в среднем на 8%. Для NOAA 11515 - на 17%. В обоих случаях максимальные площади аномалий составили примерно 7 кв. с дуги и пришлись на максимальную фазу вспышек. В NOAA 11476 транзиент существовал в течение 8 мин; в NOAA 11515 - 6 мин.

Изменения среднеквадратичных скоростей нисходящих V_{down} и восходящих V_{up} потоков в области магнитной аномалии и соответствующего потока мягкого рентгеновского излучения представлены на нижней панели рис.5. Восходящая скорость демонстрирует только плоский тренд порядка 400-500 м/с, который в основном определяется вращением Солнца. Видно, что при нарастании вспышечного излучения в NOAA 11476 скорость нисходящих потоков импульсно увеличивается примерно в три раза, и уже через 4-5 мин возвращается к довыспышечным значениям. В NOAA 11515 скорость нисходящих потоков не показывает существенного изменения.

В целом, восходящие потоки в обоих случаях доминируют над областью аномалии. При этом ни нисходящие, ни восходящие потоки не испытывают существенных изменений со временем и не показывают никакой корреляции с областями изменения знака магнитного поля.

4. *Выводы.* Проведены исследования продольного магнитного поля активных областей NOAA 11476 и NOAA 11515 по данным инструмента SDO/HMI. Обе АО во время вспышек находились вблизи центрального меридиана. В течение максимальной фазы вспышек M5.7/2B (NOAA 11476, 10 мая 2012г.) и M5.3/2B (NOAA 11515, 4 июля 2012г.) в магнитном поле АО появились транзиентные структуры. Этот феномен не совсем понятен, потому что есть вопросы относительно их физического механизма и связи с наблюдаемым аномальным изменением знака магнитной полярности, ядрами вспышки в H α и т.д. Из данных наблюдений нами были получены следующие важные характеристики этих особенностей, возникших во время максимальной фазы вспышек M5.7/2B и M5.3/2B:

1) В сильных магнитных полях отрицательной полярности возникли

области сильных полей положительной полярности. Напряженности магнитного поля менялись от -1000 Гс в предвспышечный момент до $+1000$ Гс во время максимальной фазы вспышек. Изменение магнитного поля в транзитных структурах сопровождалось сильным импульсным увеличением средней относительной интенсивности (до 17%). Эти структуры располагались в тени пятен, существовали в течение 6–8 мин и показали пространственное и временное соответствие ядрам вспышек, наблюдаемым в H α . В обоих случаях площадь, занимаемая аномалиями, составила примерно 7 кв. с дуги, что существенно меньше площади соответствующего узла H α вспышки.

2) Между изменениями потока мягкого рентгена в диапазоне 1–8 Å, магнитного потока в аномалии, ее площади и изменениями средней относительной интенсивности в фотосферной линии наблюдается хорошая корреляция. Аномальные изменения знака магнитной полярности во время вспышек M5.7/2B 10 мая 2012г. в NOAA 11476 и M5.3/2B 4 июля 2012г. в NOAA 11515 были схожими по своим характеристикам с событиями, наблюдаемыми во время вспышек X-класса, например, в NOAA 10486 и в NOAA 11515 во время вспышек X10/2B 29 октября 2003г. и X2.2 15 февраля 2011г., соответственно [10,18].

Аномальное изменение знака магнитной полярности во время мощных вспышек наблюдалось и по данным инструментов GONG и MDI, которые в своих измерениях используют линию Ni I 6768 Å (см., например, [5,18]), тогда как данные HMI для вспышек M5.7 и M5.3, исследованные в этой статье, основаны на измерениях в линии FeI 6173.3 Å. Таким образом, транзитные структуры, возникающие во время максимальной фазы вспышек, по-видимому, не связаны с линией и инструментом, используемыми в измерениях. Эти обстоятельства являются дополнительным аргументом, позволяющим рассматривать наблюдаемые магнитные транзенты как наблюдательные характеристики физических процессов, происходящих в фотосфере активных областей во время максимальной фазы вспышки.

В этой работе используются данные GONG NSO под управлением AURA в соответствии с соглашением о сотрудничестве с NSF и при дополнительной финансовой поддержке NOAA, NASA и BBC США.

Автор благодарен NASA/SDO и HMI научной команде за возможность доступа к базам данных по сети Интернет. Данные о мягких рентгеновских потоках GOES доступны в NASA/GSFC Solar Data Analysis Center (SDAC). Работа выполнена при частичной финансовой поддержке в рамках научного проекта РФФИ 16-02-00221 А.

MAGNETIC TRANSIENTS DURING THE FLARES
ON 2012 MAY 9 IN NOAA 11476 AND ON 2012
JULY 4 IN NOAA 11515

O.S.GOPASYUK

Longitudinal magnetic field changes in NOAA 11476 and NOAA 11515 during M-class solar flares were studied. Observations of the line-of-sight magnetic flux were carried out by the Solar Dynamics Observatory Helioseismic and Magnetic Imager (SDO/HMI) with temporal and spatial resolutions of 45 s and $0".5 \text{ pixel}^{-1}$, respectively. During the peak phase of the M5.7/2B flare in NOAA 11476 on 2012 May 9 and the M5.3/2B flare in NOAA 11515 on 2012 July 4 an abrupt change in the magnetic field of active regions occurred. The transient features with the opposite sign appeared in strong magnetic fields of negative polarity. Transients were located in sunspot umbrae and existed for a few minutes. These magnetic field features are studied in detail.

Key words: *Sun: activity: flares: magnetic fields*

ЛИТЕРАТУРА

1. A.Patterson, H.Zirin, *Astrophys. J.*, **243**, L99, 1981.
2. N.I.Loiziskaya, V.G.Loiziskii, *Sov. Astron. Lett.*, **8**, 270, 1982.
3. H.Wang, *Solar Phys.*, **140**, 85, 1992.
4. H.Wang, Jr.M.W.Ewell, H.Zirin et al., *Astrophys. J.*, **424**, 436, 1994.
5. A.G.Kosovichev, V.V.Zharkova, *Astrophys. J.*, **550**, L105, 2001.
6. H.Wang et al., *Astrophys. J.*, **576**, 497, 2002.
7. J.J.Sudol, J.W.Harvey, *Astrophys. J.*, **635**, 647, 2005.
8. G.J.D.Petrie, J.J.Sudol, *Astrophys. J.*, **724**, 1218, 2010.
9. S.Wang et al., *Astrophys. J.*, **745**, L17, 2012.
10. R.A.Maurya, P.Vemareddy, A.Ambastha, *Astrophys. J.*, **747**, 134, 2012.
11. O.Burtseva, J.C.Martinez-Oliveros, G.J.D.Petrie et al., *Astrophys. J.*, **806**, 173, 2015.
12. T.J.Spirock, V.B.Yurchyshyn, H.Wang, *Astrophys. J.*, **572**, 1072, 2002.
13. H.Wang, *Astrophys. J.*, **649**, 490, 2006.
14. Y.L.Song, M.Zhang, *Astrophys. J.*, **826**, 173, 2016.
15. A.Patterson, *Astrophys. J.*, **280**, 884, 1984.
16. J.Schou et al., *Solar Phys.*, **275**, 229, 2012.
17. S.M.White, R.J.Thomas, R.A.Schwartz, *Solar Phys.*, **227**, 231, 2005.
18. R.A.Maurya, A.Ambastha, *Solar Phys.*, **258**, 31, 2009.

