

УДК 523.98

## Особенности движения пятен в активных областях NOAA AR11158, NOAA AR11283 и NOAA AR11515

Ю.А. Фурсяк

ФГБУН “Крымская астрофизическая обсерватория РАН”, Научный, Крым, 298409  
[yuriy\\_fursyak@mail.ru](mailto:yuriy_fursyak@mail.ru)

Поступила в редакцию 1 октября 2016 г.

**Аннотация.** По данным SDO/HMI исследованы собственные движения отдельных пятен в трех активных областях текущего 24-го цикла солнечной активности. Проанализированы характер движения пятен, их траектории. Произведена оценка скоростей движения таких пятен в ходе эволюции активной области. Изучен характер изменения вспышечной активности области в связи с наличием значительных собственных движений отдельных пятен в группах. Отмечается влияние собственных движений пятен в исследуемых группах на формирование вспышечно-активных  $\delta$ -конфигураций магнитного поля.

MOTION FEATURES OF SUNSPOTS IN ACTIVE REGIONS NOAA AR 11158, NOAA AR 11283 AND NOAA AR11515, by Yu.A. Fursyak. Using SDO/HMI data we analyze proper motions of sunspots in three active regions of the current solar cycle 24. The character of motions as well as trajectories of sunspots are explored. Also we performed an estimation of sunspot velocities. We studied changes of the character of flare activity in sunspot groups due to the presence of significant proper motions of individual sunspots in an active region. We note the impact of sunspot motions on the formation of flare-active delta configurations in the magnetic field.

**Ключевые слова:** Солнце, солнечные пятна, движения пятен

---

### 1 Введение

Движения пятен играют значимую роль в эволюции и вспышечной активности группы пятен. Собственные движения отдельных пятен в активных областях, особенно в случае сближения с пятнами противоположной полярности, играют в резком возрастании вспышечной активности группы такую же важную роль, как и всплытие новых магнитных потоков. Такие движения приводят к изменению пространственной ориентации линии раздела полярностей (ЛРП), к возрастанию градиента продольного магнитного поля в местах сближения пятен. Это, в свою очередь, ведет к росту и накоплению магнитной энергии в этих местах, которая может быть реализована в дальнейшем в виде одной или нескольких вспышек. Мак-Интош (1969) наблюдал формирование мощной вспышечно-активной конфигурации пятен, возникшей на границах супергранулы. Эта структура двигалась сначала со скоростью около 500 м/с, но через несколько часов уменьшила скорость в 2.5 раза.

Особенности движения пятен в активных областях...

Необходимо выделить два типа движения пятен. Первый связан с эволюцией и динамикой активной области – довсплыванием магнитной трубки (де Ягер, 1962), раскручиванием магнитного жгута, возникновением новой области на месте распавшейся группы и т. п. Примером области с интенсивными движениями подобного типа можно назвать группу, наблюдавшуюся в августе 1972 года и детально рассмотренную в работе Зирина и Танаки (1973). Рост и движение пятен происходили непрерывно в течение нескольких дней, при этом головное пятно вторгалось в хвостовое. В результате этих движений в нижних слоях силовые линии располагались параллельно ЛРП (поле было не потенциальным), в верхних – перпендикулярно ей (потенциальное поле). Зирин и Лазарев (1975) описывают интересный случай повышения вспышечной активности на переднем фронте головного пятна, двигавшегося со скоростью около 280 м/с.

Второй тип обусловлен активизацией отдельных пятен за несколько часов до развития вспышки. Подобные движения непродолжительны по времени (несколько часов) и зачастую прекращаются с появлением вспышки или сразу после нее. Впервые на возможность связи между ускорением движения одного из пятен и вспышкой балла 2<sup>+</sup> было указано в работе Гопасюка и Моретона (1967). В работе Бабина (1980) также указывается на движение такого типа в области Мак-Мас 13043. Отмечено, что одно из ядер начало удаляться из сформированной  $\delta$ -конфигурации магнитного поля со скоростью более 400 м/с перед первой вспышкой балла 1В. После вспышки движения прекратились. За 3–4 часа до второй вспышки балла 2В отмечено удаление того же ядра со скоростью более 300 м/с. С возникновением вспышки этот процесс прекратился.

В данной работе анализируется первый тип движений, связанный с развитием исследуемых активных областей. Проведена оценка скорости собственных движений пятен и изучен характер влияния таких движений на изменение вспышечной активности области в целом.

## 2 Материал наблюдений

В работе проанализированы три активные области текущего цикла солнечной активности: NOAA AR11158, NOAA AR11283 и NOAA AR11515. Некоторые данные по исследуемым группам представлены в таблице 1. Отбор областей проводился по следующим критериям: 1) наличие значительных собственных движений отдельных пятен в группе; 2) нахождение области в интервале долгот  $\pm 50^\circ$  от центра диска Солнца; 3) исследуемая область должна находиться вблизи максимума своего развития (определяется по максимальным значениям общей площади группы).

В качестве исходного материала для анализа движения пятен были использованы фотогелиограммы и магнитограммы исследуемых активных областей, полученные прибором HMI (Шеррер и др., 2012) космического аппарата SDO (Песнелл и др., 2012). Для получения дополнительной информации также были использованы данные о потоке рентгеновского излучения в диапазоне длин волн 1–8 Å, полученные спутником GOES-15.

В работе использованы данные, учитывающие дифференциальное вращение Солнца. При расчете скоростей движения пятен, а также в случаях определения линейных расстояний между пятнами был учтен эффект проекции.

## 3 Расчет смещения пятен и скорости их движения

Для расчета смещения пятна в группе были использованы массивы данных SHARP (Space-weather HMI Active Region Patches), доступные на ресурсе <http://jsoc2.stanford.edu/ajax/>. Пространственное разрешение магнитограмм составляет 0.5", что соответствует линейному масштабу в 363 км, временное разрешение – 1 час.

Таблица 1. Некоторые данные по исследуемым активным областям

Номер области	Дата	Координаты области	Общая площадь группы, м.д.п.	Вспышки			
				С	М	Х	Общее количество
NOAA AR11158	13.02.2011	S19 E11	40	2	1	–	3
	14.02.2011	S20 W03	120	10	1	–	11
	15.02.2011	S21 W14	450	4	–	1	5
	16.02.2011	S21 W27	600	10	1	–	11
	17.02.2011	S21 W39	620	11	–	–	11
NOAA AR11283	04.09.2011	N14 E24	220	–	–	–	0
	05.09.2011	N13 E11	190	–	–	–	0
	06.09.2011	N14 W04	220	–	1	1	2
	07.09.2011	N14 W18	200	1	–	1	2
	08.09.2011	N14 W32	230	3	1	–	4
NOAA AR11515	02.07.2012	S17 E17	850	8	3	–	11
	03.07.2012	S17 E04	620	15	–	–	15
	04.07.2012	S16 W10	570	9	6	–	15
	05.07.2012	S17 W23	640	12	9	–	21
	06.07.2012	S17 W36	670	7	6	1	14
	07.07.2012	S18 W50	900	5	2	–	7

Смещение пятна рассчитывалось как изменение координат максимума напряженности магнитного поля в исследуемом пятне относительно начала координат прямоугольника, содержащего анализируемую активную область и движущегося со скоростью, равной скорости дифференциального вращения Солнца на широте активной области.

Скорости движения пятен рассчитывались по формуле:

$$v[m/c] = \left( \frac{\sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2}}{3600} \right) / \cos\theta,$$

где  $x_1, y_1, x_0, y_0$  – соответственно конечные и начальные координаты максимума напряженности магнитного поля в исследуемом пятне;  $\theta$  – угловое расстояние группы от центра диска Солнца (таким образом учитывался эффект проекции).

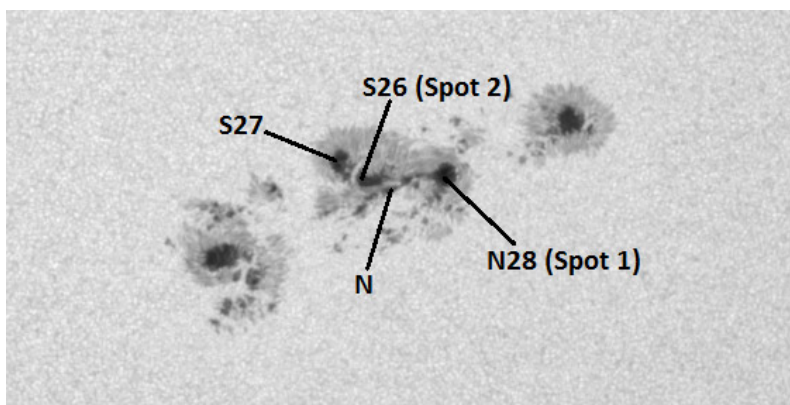
## 4 Особенности движения пятен в исследуемых группах

### 4.1 NOAA AR11158

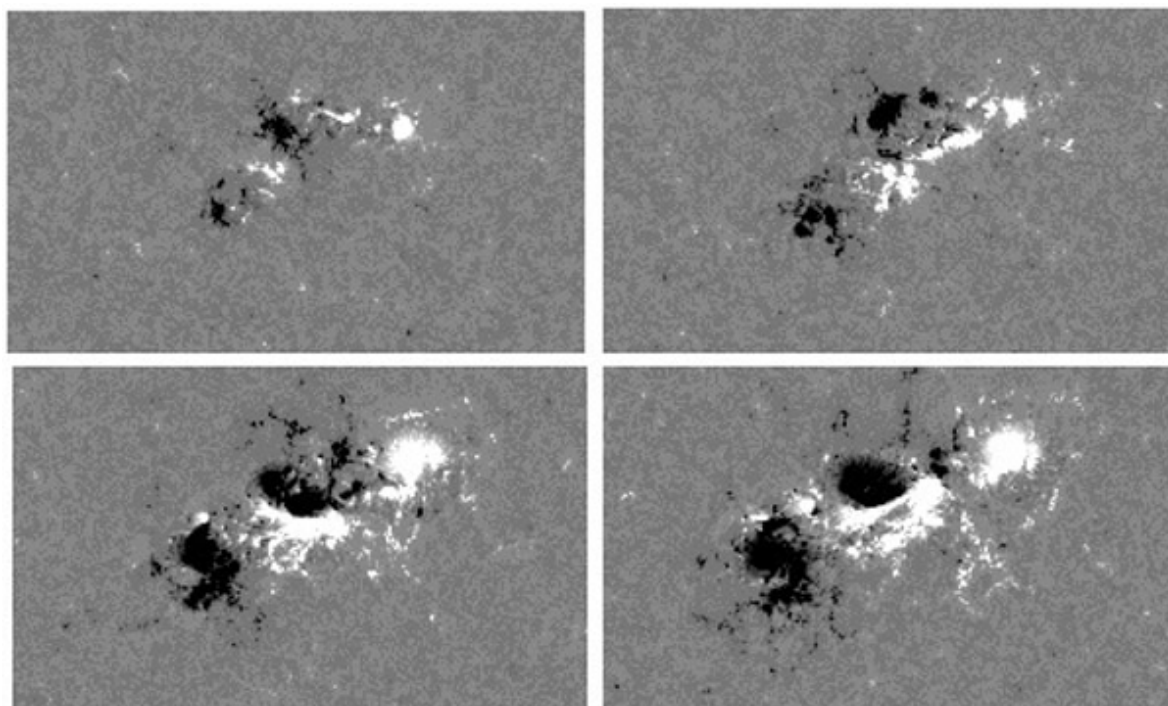
Активная область сформировалась путем слияния двух биполярных структур. Вблизи максимума развития в центральной части области сформировалась вспышечно-активная  $\delta$ -конфигурация магнитного поля (рис. 1). Ее формирование обусловлено взаимным сближением хвостового пятна верхнего (северного) биполя и лидера нижней (южной) биполярной группы

Особенности движения пятен в активных областях...

(рис. 2). Движения этих двух пятен области NOAA AR11158 (отмечены стрелками на рис. 1) и были исследованы в рамках данной работы.

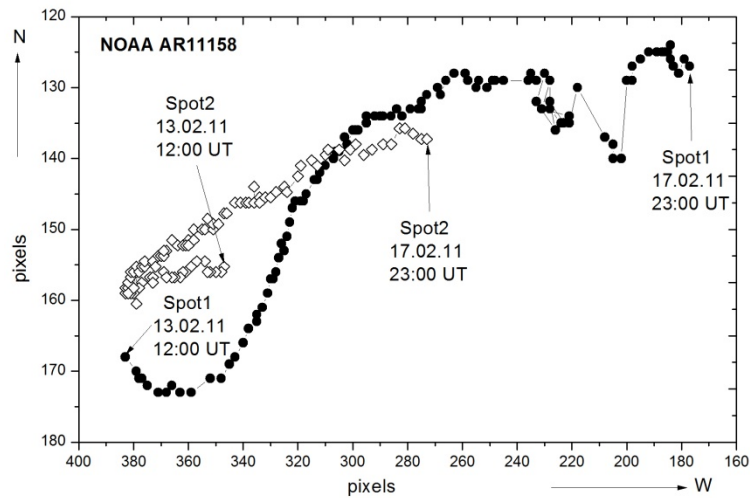


**Рис. 1.** Фотогелиограмма области NOAA AR11158 15 февраля 2011 года. Указаны полярности пятен в центральной подгруппе со сформированной  $\delta$ -конфигурацией магнитного поля и напряженности поля в них (в сотнях гаусс). Обозначены пятна, движения которых исследовались в рамках работы

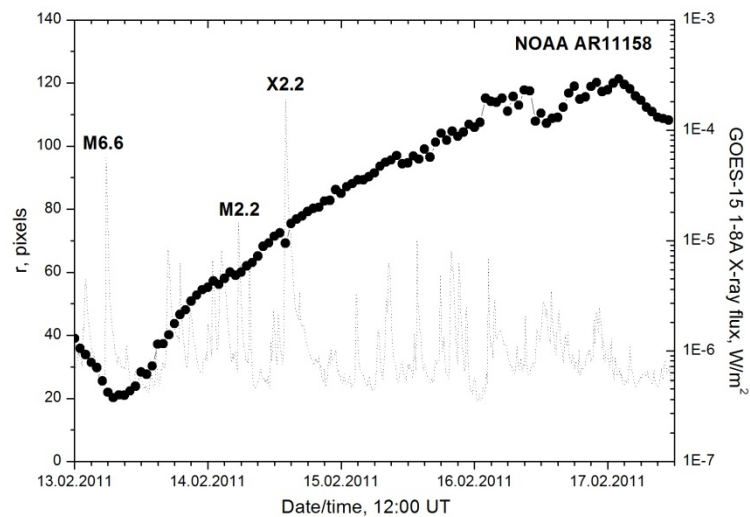


**Рис. 2.** Развитие  $\delta$ -конфигурации магнитного поля в области NOAA AR11158 с 00:00 UT 12 февраля по 00:00 UT 15 февраля 2011 года. Данные SDO/HMI

Исследования движения двух пятен центральной подгруппы области начаты в 12:00 UT 13.02.2011. На рис. 3 представлены трассеры движения исследуемых пятен. Пятно 1 (лидер нижней, южной, биполярной группы) имело преимущественное направление движения на северо-запад, сместившись за 108 часов на расстояние около 80 Мм на запад и на 15 Мм на север относительно начального положения.



**Рис. 3.** Трассеры движения исследуемых пятен области NOAA AR11158. Время мониторинга – с 12:00 UT 13.02.2011 по 23:00 UT 17.02.2011



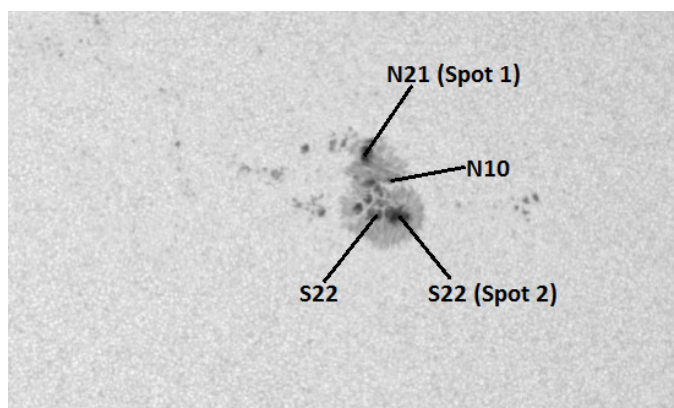
**Рис. 4.** Изменение расстояния между исследуемыми пятнами (точки) области NOAA AR11158 за время мониторинга. Пунктирная кривая – поток рентгеновского излучения в диапазоне 1–8 Å на орбите Земли. Отмечены наиболее мощные вспышки, источником которых являлась исследуемая в работе область. Горизонтальная ось – дата и время (на середину суток, 12:00 UT)

В то же время пятно 2 (см. рис. 1) имело более сложное движение. Изначально преобладало смещение пятна на восток (на расстояние 11 Мм относительно начального положения), а далее – движение на юго-запад, как следует из рис. 2.

Первая мощная вспышка в группе (M6.6, начало в 17:28 UT 13.02.2011) по времени приблизительно совпадает с достижением минимального расстояния между движущимися пятнами (рис. 4). Последующие мощные вспышки, возникающие в области над центральной подгруппой, связаны с нестабильностью  $\delta$ -конфигурации магнитного поля, обусловленной в том числе движениями пятен.

#### 4.2 NOAA AR11283

Данная область представляет значительный интерес, поскольку в ней зафиксировано 4 мощных вспышки (M5.3 06.09.2011 01:35 UT, X2.1 06.079.2011 22:12 UT, X1.8 07.09.2011 22:32 UT, M6.7 07.09.2011 15:32 UT) за интервал времени около 48 часов. Такая активность не характерна для групп пятен, обладающих незначительной общей площадью в максимуме развития (для NOAA AR11283 общая площадь в максимуме не превышала 250 миллионов долей полусферы (м. д. п.)). Возрастание вспышечной активности области, как отмечено в более ранних работах (Фурсяк, 2013, 2015), обусловлено выходом на поверхность вблизи лидера группы нового потока и формированием крупного пятна противоположной полярности, обладающего значительным собственным движением (рис. 5). Это приводило к резкому изменению пространственной ориентации ЛРП, значительному возрастанию градиента продольного магнитного поля в этой области и формированию  $\delta$ -конфигурации. Подобные изменения указывают на возрастания вспышечной активности группы пятен в целом (Коваль, 1974; Северный и др., 1979).

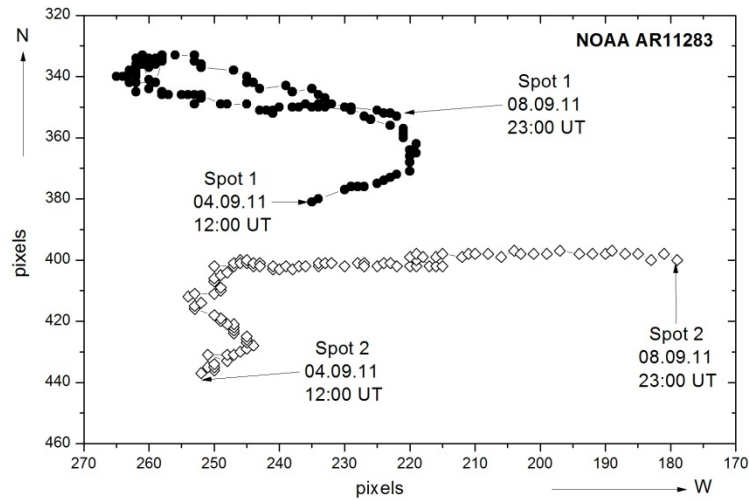


**Рис. 5.** Фотогелиограмма области NOAA AR11283 от 07.09.2011 00:00 UT вблизи максимума развития. Указаны напряженности поля (в сотнях гаусс) пятен  $\delta$ -структуры. Обозначены пятна, движение которых исследовалось в работе. Данные SDO/HMI

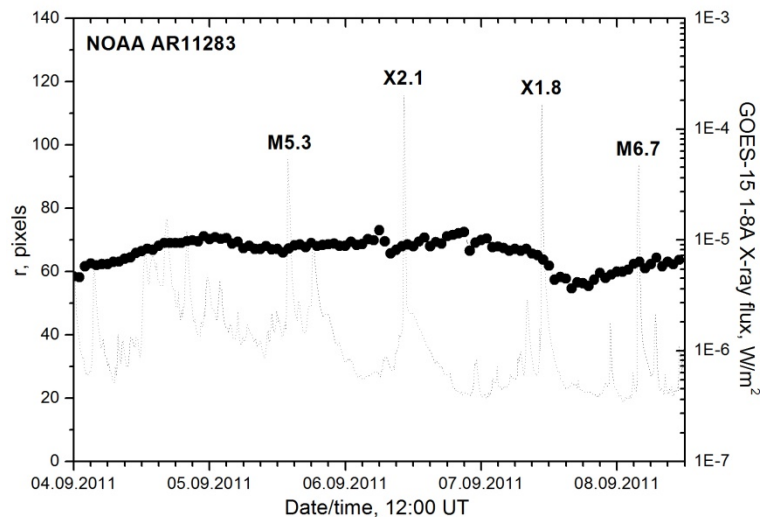
Трассеры исследуемых пятен области NOAA AR11283 представлены на рис. 6. Сформировавшееся севернее лидера группы пятно 1 (см. рис. 5) изначально двигалось в направлении северо-запад, сменив через 16 часов направление движения на северо-восток. Через 30 часов после смены направления движения наступила фаза квазистабильного положения, в которой пятно пребывало на протяжении 30 часов. В дальнейшем, до конца мониторинга (08.09.2011 23:00 UT), пятно 1 обладало выраженным движением в направлении юго-запада.

Подобное поведение пятна 1 в первые 16–18 часов могло быть обусловлено всплытием закрученной магнитной трубки севернее лидера группы, а в последующие 30–36 часов – раскручиванием магнитного жгута и движением сформированного пятна в хвостовую часть группы с преобладающей N-полярностью.

Лидер группы (пятно 2) обладал более простым движением. Изначально отмечено смещение пятна в северном направлении на сближение с формирующимся пятном 1. Через 36 часов движение на север прекращается и до конца мониторинга группы преобладает смещение пятна 2 в западном направлении (смещение на запад относительно начального положения в линейном масштабе составило около 26 Мм).



**Рис. 6.** Трассеры движения исследуемых пятен в области NOAA AR11283. Время мониторинга – с 12:00 UT 04.09.2011 по 23:00 UT 08.09.2011. Указаны начальные и конечные точки траектории пятен



**Рис. 7.** Изменение расстояния между исследуемыми пятнами области NOAA AR11283 за время мониторинга. Пунктирная кривая – поток рентгеновского излучения в диапазоне 1–8 Å на орбите Земли. Отмечены наиболее мощные вспышки, источником которых являлась исследуемая в работе область. Обозначения те же, что и на рис. 3

Одной из особенностей движения исследуемых пятен области NOAA AR11283 является квазипостоянство расстояния между ними. Это расстояние составляет 50–70 пиксел, что соответствует, с учетом эффекта проекции, линейному расстоянию в 17–28 Мм (рис. 7).

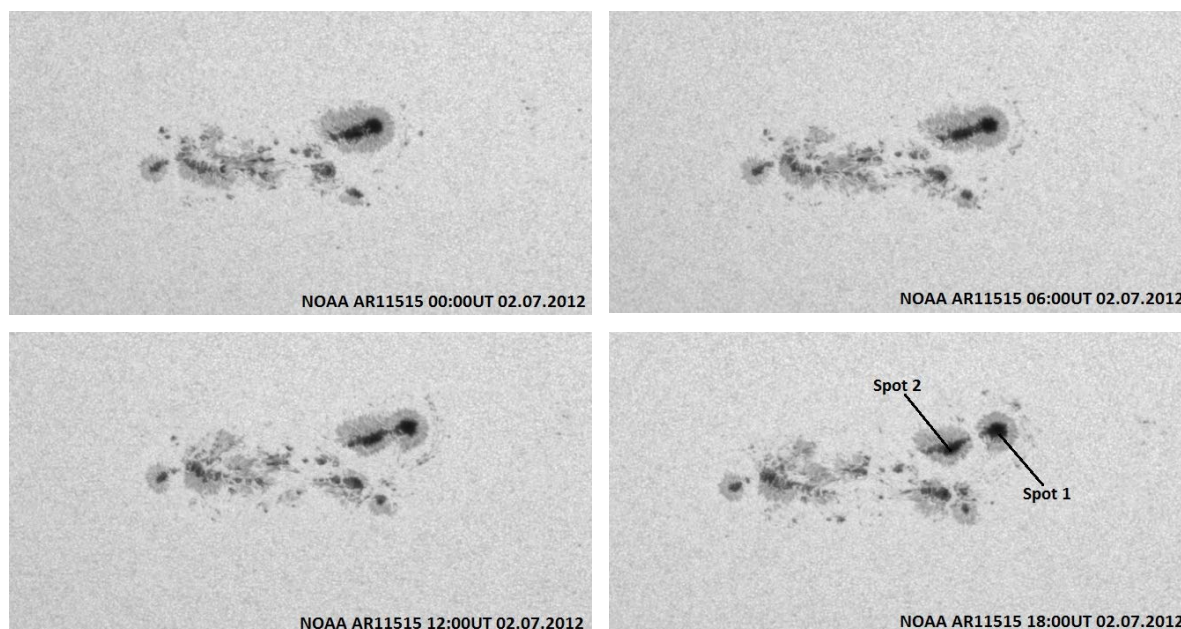
#### 4.3 NOAA AR11515

Особенностью данной группы было разделение большого лидирующего пятна большой площади на две части (рис. 8). При этом пятно 1 (рис. 9) двигалось в северо-западном направлении, удалившись на значительное расстояние от центральной части группы. В то же время пятно 2

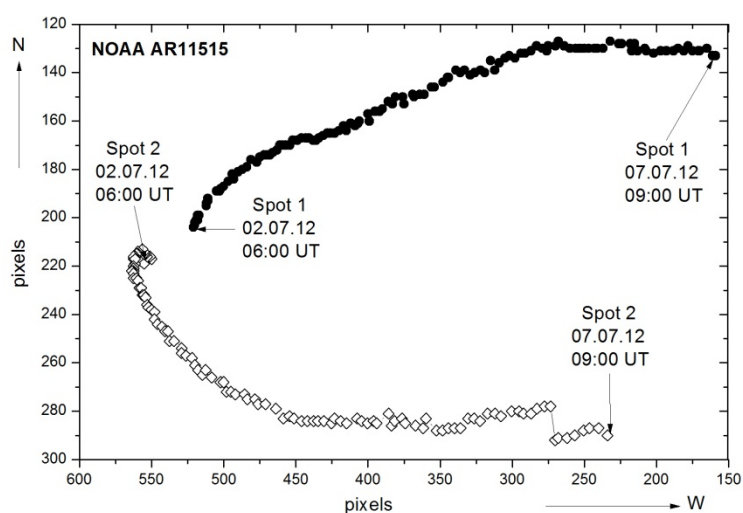


Особенности движения пятен в активных областях...

(восточная часть распавшегося лидера) изначально двигалось преимущественно в южном направлении, сближаясь с формирующейся биполярной структурой в центральной части области, формируя при этом вспышечно-активную конфигурацию магнитного поля (рис. 10). Через 48 часов после начала мониторинга смещение пятна 2 на юг, юго-запад (см. рис. 9) сменяется его движением в западном направлении.

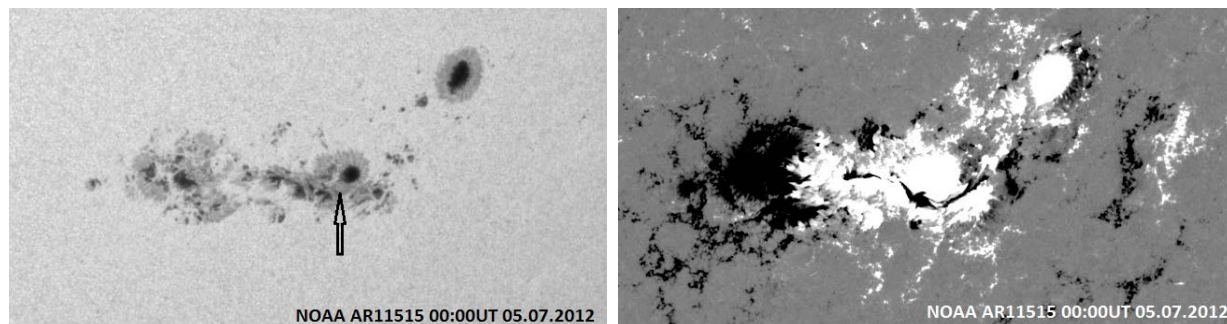


**Рис. 8.** Деление головного пятна области NOAA AR11515 на два пятна меньшей площади 2 июля 2012 года. Данные SDO/HMI. На правой нижней фотогелиограмме отмечены пятна, движения которых исследованы в работе



**Рис. 9.** Трассеры движения исследуемых пятен области NOAA AR11515, образовавшихся путем распада большого по площади головного пятна группы, за время мониторинга (с 06:00 UT 02.07.2012 по 09:00 UT 07.07.2012). Указаны начальные и конечные точки траектории пятен





**Рис. 10.** Фотогелиограмма (слева) и магнитограмма (справа) области NOAA AR11515 в 00:00 UT 05.07.2012, отображающие сформированную в результате вспышки новых биполярных потоков и движения пятна 2 вспышечно-активную конфигурацию магнитного поля (указана стрелкой на фотогелиограмме слева)

## 5 Выводы

На основе анализа полученного материала можно сделать следующие выводы:

1. Собственные движения отдельных пятен в трех рассмотренных активных областях приводили к формированию вспышечно-активных  $\delta$ -конфигураций магнитного поля.
2. Наличие постоянных смещений на протяжении трех и более суток свидетельствует о связи собственных движений пятен с эволюцией активной области в целом.
3. Скорости собственных движений пятен изменялись хаотично. Их значения находились в диапазоне от 0 до 800 м/с при точности  $\pm 50$  м/с. Явной корреляции между изменениями скорости движения пятна и возникновением вспышечного процесса не обнаружено. Это может быть связано с тем, что движения пятен, связанные с их активизацией перед вспышками, возникают на значительно меньших временных и пространственных масштабах, чем представленные в данной работе.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 16-02-00221 А.

**Благодарности.** Автор благодарит команду SDO/HMI за возможность свободного использования данных, сотрудников КраО РАН А.Н. Бабина и А.Н. Коваль за советы и замечания, которые помогли улучшить данную работу.

## Литература

- Бабин А.Н. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1980. Т. 62. С. 142.  
 Гопасюк, Моретон (Gopasyuk S.I., Moreton G.E.) // Proc. Astron. Soc. Australia. 1967. V. 1. N. 1. P. 8.  
 Де Ягер (C. de Jager) // Строение и динамика атмосферы Солнца / Ред. Э.Р. Мустель. М.: Издательство иностранной литературы. 1962. С. 120.  
 Зирин, Лазарев (Zirin H., Lazareff B.) // Solar Phys. 1975. V. 41. N. 2. P. 425.  
 Зирин, Танака (Zirin H., Tanaka K.) // Solar Phys. 1973. V. 32. N. 1. P. 173.  
 Коваль А.Н. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1974. Т. 51. С. 13.  
 Мак-Интош (McIntoch P.S.) // Annual IQSY. Cambridge. London. 1969. V. 3. P. 40.  
 Песнелл и др. (Pesnell W. Dean, Thompson B.J., Chamberlin P.C.) // Solar Phys. 2012. V. 275. P. 3.

Особенности движения пятен в активных областях...

Северный и др. (Severny A.B., Stepanyan N.N., Steshenko N.V.) // Solar-terrestrial prediction proceedings. V. 1. Prediction group report. Boulder. Colorado. Space Environment Laboratory. 1979. P. 72.

Фурсяк Ю.А. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2013. 109. № 4. С. 113.

Фурсяк Ю.А. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2015. 111. № 1. С. 19.

Шеррер и др. (Scherrer P.H., Schou J., Bush R.I., Kosovichev A.G., Bogart R.S., Hoeksema J.T., Liu Y., Duvall Jr. T.L., Zhao J., Title A.M., Schrijver C.J., Tarbell T.D., Tomczyk S.) // Solar Phys. 2012. V. 275. P. 207.