

УДК 523.985

## **Градиенты продольного магнитного поля и движения пятен в группах с высокой вспышечной активностью (две и более вспышки рентгеновского класса X)**

*Ю.А. Фурсяк*

ФГБУН “Крымская астрофизическая обсерватория РАН”, Научный, Крым, 298409  
*yuriy\_fursyak@mail.ru*

Поступила в редакцию 11 ноября 2015 г.

**Аннотация.** В работе проанализированы особенности морфологической структуры и магнитной конфигурации групп пятен текущего, 24-го цикла активности Солнца, в которых зафиксированы две или более вспышки рентгеновского класса X. Произведены расчеты градиентов продольных магнитных полей в местах формирования  $\delta$ -конфигурации магнитного поля в активных областях. Обнаружена временная задержка между ростом градиента продольного магнитного поля выше критического уровня в 0.1 Гс/км и моментом начала первой из вспышек рентгеновского класса X. Исследовано движение пятна N-полярности в области NOAA AR11283 в направлении запад-восток. Обнаружен рост скорости движения пятна перед вспышками классов M и X.

В работе использованы данные ряда наземных (150-футовый солнечный телескоп обсерватории Маунт-Вилсон, БСТ-2 НИИ “КрАО”) и космических (SDO, GOES-15) солнечных телескопов.

GRADIENTS OF THE LONGITUDINAL MAGNETIC FIELD AND MOVEMENTS OF SPOTS IN HIGH FLARE ACTIVITY SUNSPOT GROUPS (TWO OR MORE X-CLASS SOLAR FLARES), by Yu.A. Fursyak. We analyzed the features of morphological structure and magnetic configuration of several sunspot groups of the current solar activity cycle, which had high flare activity (two or more X-class solar flares). Calculations of longitudinal magnetic field gradients in the places of formation of  $\delta$ -structures of magnetic field configuration were made. We detected a time delay between the growth of the longitudinal magnetic field gradient above the critical level of 0.1 G/km and the start of the first X-class solar flare. The motion of N-polarity sunspot in the NOAA AR11283 in east-west direction was investigated. A growth of the speed of movement of the spot before the M- and X-class solar flares was detected.

When working on the paper we used data of a number of ground-based (150-foot Solar Telescope of the Mount Wilson Solar Observatory, Tower Solar Telescope BST-2 of the Crimean Astrophysical Observatory and space (SDO, GOES-15) solar telescopes.

**Ключевые слова:** солнечные вспышки, магнитные поля, градиенты магнитного поля

---

## 1 Введение

Вспышка является весьма сложным физическим явлением и одним из наиболее ярких проявлений солнечной активности. Разработаны различные методы прогнозирования вспышечных процессов. Результаты таких прогнозов должны давать ответ на три вопроса: где будет локализована вспышка, какой будет ее мощность, и когда она начнется. Первые два критерия (локализация и мощность) определяются путем детального изучения морфологии и эволюции самой активной области, особенностей ее магнитной конфигурации. Так, в 1954 году А.Б. Северный и Е.Ф. Шапошникова (Северный, Шапошникова, 1954) показали, что появление вспышек в активной области связано с наличием большого числа неустойчивых пятен. Также очень большое влияние при формировании вспышечноактивных конфигураций оказывают собственные движения пятен в области.

Энергия магнитного поля является основным источником энергии вспышек. Поэтому многие критерии прогноза вспышек базируются как раз на анализе особенностей магнитной конфигурации активной области. В работах В. Бумбы (1958) и А.Б. Северного (1958) проведено сравнение положения вспышек с особенностями магнитного поля. Установлено, что узлы вспышек располагаются вблизи линии раздела полярностей (ЛРП), с двух сторон от нее. Несколько позже, в 1960 году, было найдено, что мощные вспышки появляются в областях сложной магнитной конфигурации с высоким градиентом магнитного поля Гс/км (Северный, 1960).

Ориентация и форма ЛРП также может служить источником информации о вспышечной активности группы пятен. Сложная, извилистая ЛРП указывает на благоприятные условия возникновения вспышек. А.Н. Коваль (1974) на основе анализа большого числа случаев было установлено, что вспышки балла  $\geq 2$  появляются в областях, где вся ЛРП или же отдельные ее участки располагаются параллельно экватору.

Сложнее определить точное время возникновения вспышечного процесса. Несмотря на значительные успехи в прогнозировании и накопленный большой наблюдательный материал, вопрос о спусковом механизме вспышек остается открытым.

## 2 Задачи работы

Основной задачей данной работы является оценка градиентов продольного магнитного поля и характера движения отдельных пятен в областях с высокой вспышечной активностью (две и более вспышки рентгеновского класса X). Чтобы избежать значительных ошибок при вычислении градиентов магнитного поля и скоростей движения пятен из-за перспективного сокращения, рассматривались активные области в пределах  $\pm 65^\circ$  от центра диска Солнца.

## 3 Используемые данные

В работе использовались данные следующих наземных и космических телескопов:

- фотогелиограммы и магнитограммы (приборы AIA/SDO и HMI/SDO);
- информация о напряженностях магнитных полей пятен в исследуемых активных областях (БСТ-2 НИИ “КрАО” и 150-футовый солнечный телескоп обсерватории Маунт-Вилсон);
- поток рентгеновского излучения в диапазоне длин волн 1–8 Å на орбите Земли (GOES-15).

Используемые интернет-ресурсы:

- [http://solar.crao.crimea.ua/rus/sunspots\\_mf.htm#archive](http://solar.crao.crimea.ua/rus/sunspots_mf.htm#archive) – архив измерений магнитных полей пятен на телескопе БСТ-2 Крымской астрофизической обсерватории;
- <ftp://howard.astro.ucla.edu/pub/obs/drawings> – архив измерений магнитных полей пятен на 150-футовом солнечном телескопе обсерватории Маунт-Вилсон;
- <http://heliviewer.org/>, <http://sdo.gsfc.nasa.gov/data/aiahmi/> – сайт использовался для получения фотогелиограмм и магнитограмм активных областей с космического аппарата SDO;
- <http://www.thesis.lebedev.ru/> – координаты центров исследуемых групп пятен, общая площадь области;
- [http://www.lmsal.com/solarsoft/latest\\_events\\_archive.html](http://www.lmsal.com/solarsoft/latest_events_archive.html) – некоторые данные о вспышках (время начала (UT), максимальное значение потока рентгеновского излучения в диапазоне 1–8 Å на орбите Земли).

#### 4 Анализ и результаты

В работе рассмотрены три активные области, которые отобраны по следующим критериям:

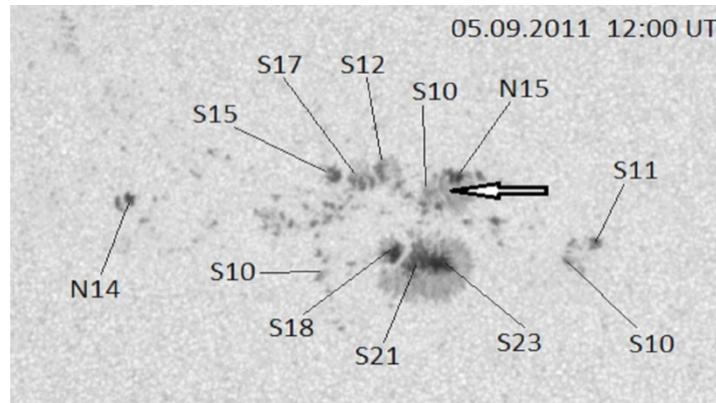
- Наличие не менее двух вспышек рентгеновского класса X.
- Расположение области на момент первой из мощных вспышек в пределах  $\pm 65^\circ$  от центра диска Солнца.

**Таблица 1.** Данные о вспышках и местах измерения градиентов продольного магнитного поля в исследуемых активных областях

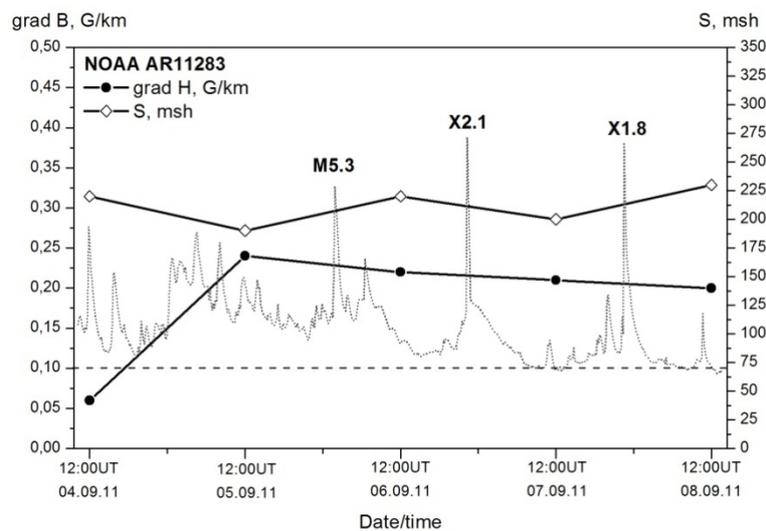
| Номер активной области (NOAA) | Рентгеновский класс вспышки | Дата и время начала вспышки (UT) | Координаты центра вспышки | Координаты области измерения градиентов на момент вспышки |
|-------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|---------------------------|---|
| 11283                         | X2.1                        | 06.09.2011 22:12                 | N13 W18                   | N14 W16   |
| 11283                         | X1.8                        | 07.09.2011 22:32                 | N14 W31                   | N14 W32   |
| 11429                         | X1.1                        | 05.03.2012 02:30                 | N19 E58                   | N18 E56   |
| 11429                         | X5.4                        | 07.03.2012 00:02                 | N18 E31                   | N17 E31   |
| 12192                         | X1.6                        | 22.10.2014 14:02                 | S14 E13                   | S14 E13   |
| 12192                         | X3.1                        | 24.10.2014 21:07                 | S22 W21                   | S14 W13   |
| 12192                         | X1.0                        | 25.10.2014 16:55                 | S10 W22                   | S12 W28   |
| 12192                         | X2.0                        | 26.10.2014 10:04                 | S13 W37                   | S12 W37   |
| 12192                         | X2.0                        | 27.10.2014 14:12                 | S18 W57                   | S12 W52   |

Некоторые данные о вспышках в исследуемых группах пятен представлены в таблице 1. Особенности морфологии, эволюции и структуры магнитных полей в представленных группах пятен рассмотрены в ранее опубликованной работе (Фурсяк, 2015). Для всех трех рассмотрен-

ных в работе групп нами были рассчитаны градиенты продольного магнитного поля в местах возникновения сильных вспышек с временным промежутком в 24 часа.



**Рис. 1.** Формирование N-пятна в области NOAA AR11283 (указано стрелкой). Фотогелиограмма HMI/SDO 12:00UT 05.09.2011

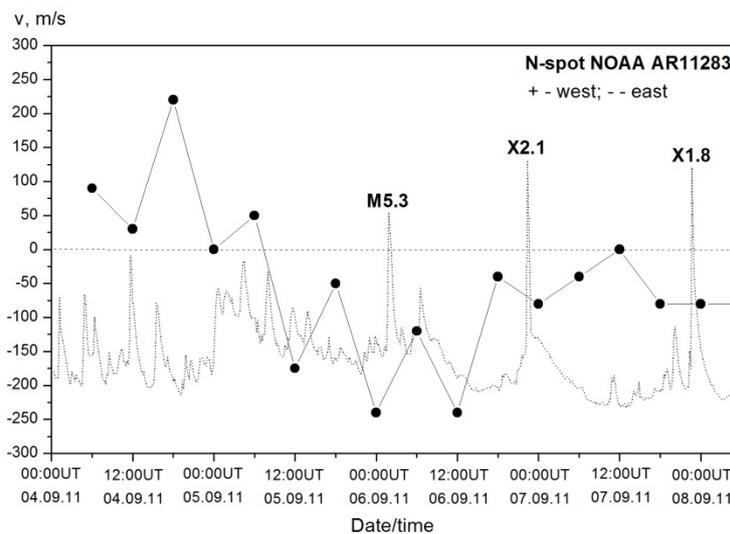


**Рис. 2.** Изменение градиента магнитного поля (кривая с точками) и общей площади группы (кривая с ромбиками) NOAA AR11283 с 04.09.2011 по 08.09.2011. Горизонтальная пунктирная линия – уровень 0.1 Гс/км; точечная кривая – поток рентгеновского излучения на орбите Земли в диапазоне длин волн 1–8 Å

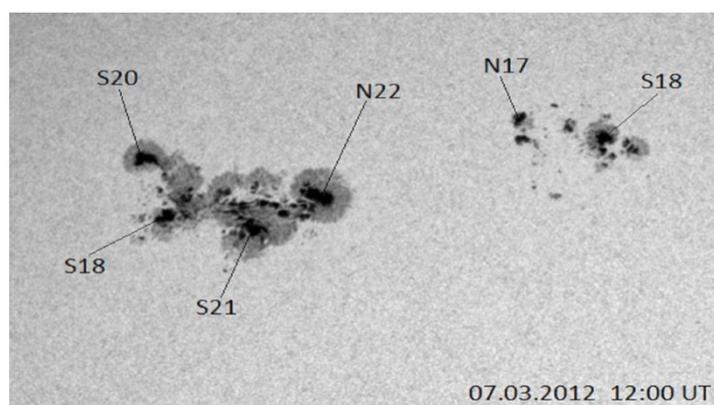
Группа **NOAA AR11283** начала активно развиваться с 4 сентября 2011 года, когда севернее пятен ведущей S-полярности выходил поток противоположной N-полярности. Фотогелиограмма, полученная через сутки, 5 сентября, показывает наличие сформировавшегося пятна с напряженностью поля в 1500 Гс (рис. 1). Выход нового потока сильно меняет пространственную ориентацию ЛРП и приводит к резкому росту градиента магнитного поля в этой области выше критического уровня 0.1 Гс/км, что отображено на графике (рис. 2). 6 сентября в пятне N-полярности зафиксирована напряженность поля в 2100 Гс (по данным телескопа БСТ-2 НИИ “КрАО”).

Следует отметить, что с момента превышения критического уровня градиента магнитного поля до начала развития первой вспышки X-класса прошло около 48 часов.

Нами были рассчитаны скорости движения пятна N-полярности в направлении восток-запад за период с 04.09.2011 по 08.09.2011 включительно с интервалом в 6 часов. Появившись 4 сентября, новое пятно начинает движение в западном направлении со скоростью до 220 м/с (рис. 3). Направление движения изменяется после 06:00 UT 5 сентября. Пятно начинает двигаться в противоположном, восточном, направлении со скоростью до 240 м/с, сближаясь с большими пятнами ведущей полярности.



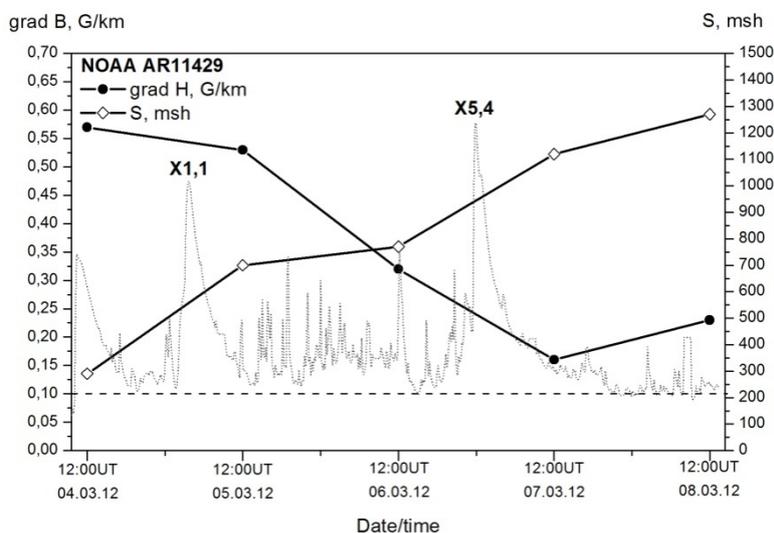
**Рис. 3.** Движение пятна N-полярности в области NOAA AR11283 с 04.09.2011 по 08.09.2011. Положительные значения скорости соответствуют движению в западном направлении, отрицательные – в восточном направлении



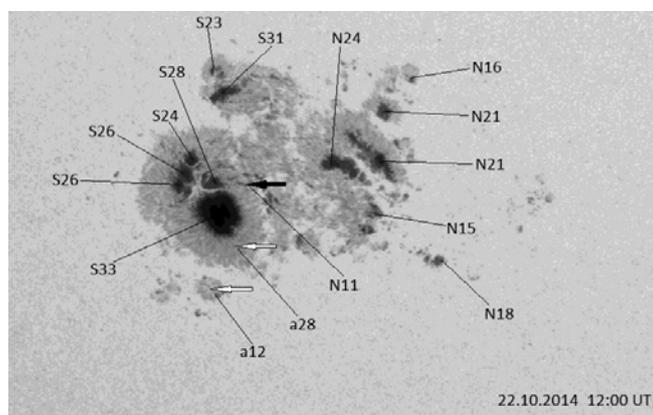
**Рис. 4.** Распределение магнитных полей пятен в области NOAA AR11429 12:00 UT 07.03.2012 по данным обсерватории Маунт-Вилсон

Наиболее интересным является рост скорости движения пятна перед мощными вспышками класса M и X, что, вероятно, обусловлено выходом новых потоков S-полярности, с которыми взаимодействовало пятно полярности N, и слиянием полутеней больших пятен N- и S-полярностей (формированием  $\delta$ -конфигурации магнитного поля). Перед вспышкой X1.8

07.03.2012 вместе с некоторым ростом скорости движения N-пятна на восток наблюдалось достаточно быстрое его смещение в южном направлении, к большим пятнам S-полярности.



**Рис. 5.** Изменение градиента магнитного поля (кривая с точками) и общей площади группы (кривая с ромбиками) NOAA AR11429 с 04.03.2012 по 08.03.2012. Горизонтальная пунктирная линия – уровень 0.1 Гс/км; точечная кривая – поток рентгеновского излучения на орбите Земли в диапазоне длин волн 1–8 Å



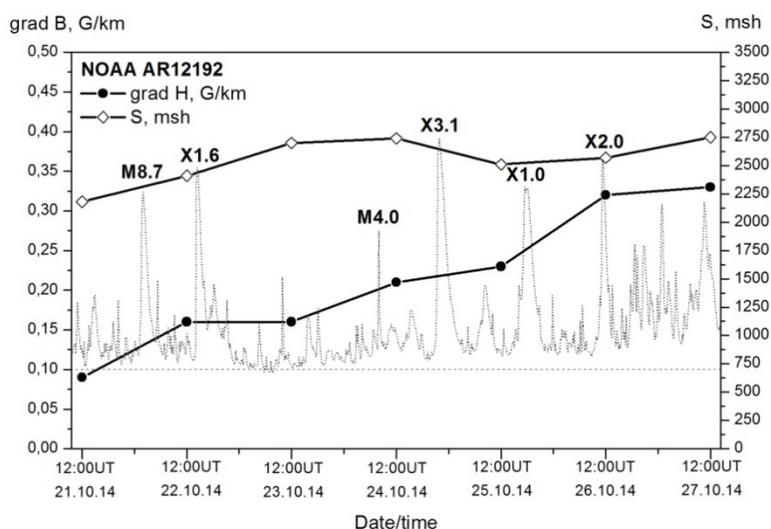
**Рис. 6.** Формирование  $\delta$ -структуры в области NOAA AR12192 (черная стрелка). Светлыми стрелками указаны места появления новых пятен. Фотогелиограмма HMI/SDO 22.10.2014

**NOAA AR11429** (рис. 4). Эта область являлась одной из наиболее интересных с начала 24-го цикла активности Солнца. Характерными особенностями группы являлись обращение полярностей относительно нормального для текущего цикла активности, а также небольшая долготная протяженность (менее 10 гелиографических градусов вблизи максимума развития). Данный факт может указывать на то, что группа выходила на поверхность в виде компактного закрученного магнитного жгута (тип I по классификации Зирина и Лигетт (1987)). Как и следовало ожидать, область обладала высокой вспышечной активностью: за период прохождения по видимому диску Солнца в ней зафиксировано 45 вспышек различной мощности, две из которых имели рентгеновский класс X. Заметим, что градиенты магнитного поля в группе изначально

Градиенты продольного магнитного поля и движения пятен...

значительно превышали критический уровень 0.1 Гс/км, но первая из вспышек X-класса начала развиваться не ранее, чем через 48 часов после формирования группы. Изменение градиентов продольного магнитного поля области представлено на рис. 5.

Активная область **NOAA AR12192** характеризовалась большой долготной протяженностью и общей площадью пятен вблизи максимума своего развития. Группа являлась источником шести вспышек рентгеновского класса X, пять из которых наблюдались после формирования  $\delta$ -структуры в хвостовой части группы (рис. 6). Градиенты магнитного поля области представлены на рис. 7. Превышение уровня 0.1 Гс/км совпадает по времени с формированием  $\delta$ -структуры, а первые мощные вспышки зафиксированы через 24–36 часов после превышения критического уровня.



**Рис. 7.** Изменение градиента магнитного поля (кривая с точками) и общей площади группы (кривая с ромбиками) AR12192 с 21.10.2014 по 27.10.2014. Горизонтальная пунктирная линия – уровень 0.1 Гс/км; точечная кривая – поток рентгеновского излучения на орбите Земли в диапазоне длин волн 1–8 Å

Отметим также, что сформированная 20–21 октября  $\delta$ -конфигурация магнитного поля в области NOAA AR12192 являлась достаточно стабильной и наблюдалась до 30 октября включительно, когда группа зашла за западный лимб Солнца.

## 5 Выводы

На основе полученного материала можно сделать следующие выводы:

1. Оценка градиентов продольного магнитного поля для рассмотренных групп дает значения, превышающие найденное А.Б. Северным значение в 0.1 Гс/км, критическое для возникновения сильных вспышек.
2. Возникновение вспышек связано с выходами новых магнитных потоков, собственными движениями пятен в группе, усилением градиентов магнитных полей и изменением пространственной ориентации ЛРП.
3. Произведена оценка движения пятна полярности N в области NOAA AR11283 в направлении восток-запад. Выявлен рост скорости движения пятна перед вспышками рентгеновских классов M и X, что можно объяснить взаимодействием с выходящими потоками противоположной полярности вблизи движущегося пятна и формированием

$\delta$ -конфигурации магнитного поля в области. Перед вспышкой X1.8 07.03.2012 вместе с ростом скорости движения N-пятна на восток наблюдалось также достаточно быстрое его смещение в южном направлении, к большим пятнам S-полярности.

4. Вспышки класса X возникали через некоторое время (не менее 24–36 часов) после того, как градиент продольного магнитного поля превышал критическое значение 0.1 Гс/км. Эти данные позволяют предположить, что большие градиенты магнитных полей являются необходимым, но не достаточным условием для возникновения мощных вспышек.

**Благодарности.** Автор выражает искреннюю благодарность сотрудникам Лаборатории физики Солнца А.Н. Бабину, А.Н. Коваль и Н.Н. Степанян за консультации и полезные замечания по работе.

### Литература

- Бумба В. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1958. Т. 19. С. 105.  
Зирин, Лигетт (Zirin H., Ligett M.) // Solar Phys. 1987. V. 113. P. 268.  
Коваль А.Н. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1974. Т. 51. С. 13.  
Северный А.Б. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1958. Т. 19. С. 22.  
Северный А.Б. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1960. Т. 22. С. 12.  
Северный А.Б., Шапошникова Е.Ф. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1954. Т. 12. С. 3.  
Фурсяк Ю.А. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2015. Т. 111. № 1. С. 19.