

УДК 523.985.3

## Вспышки класса X в 24 цикле солнечной активности: предвспышечная и послевспышечная ситуации в активной области. Часть 1. Критерии анализа и общие замечания

Ю.А. Фурсяк

НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория” КНУ им. Т. Шевченко, Научный,  
АР Крым, Украина, 98409  
*yuriy\_fursyak@mail.ru*

Поступила в редакцию 28 октября 2013 г.

**Аннотация.** В работе проанализированы данные по вспышкам рентгеновского класса X в 24 цикле солнечной активности. Также проанализирован ряд характеристик активной области (морфологическая структура, изменения в структуре магнитных полей пятен, динамика развития и т. д.) с целью выделить факторы, которые в наибольшей степени влияют на вспышечную активность группы. Для получения максимального количества информации использованы данные разных уровней атмосферы Солнца, полученные с использованием как наземных, так и космических (SOHO, SDO, XRT, Hinode и др.) телескопов.

X-CLASS FLARES DURING SOLAR CYCLE 24: PRE-FLARE AND POST-FLARE CONDITIONS IN ACTIVE REGIONS, *by Yu.A. Fursiak*. The paper presents the analysis of data on X-class solar flares during solar cycle 24. A number of characteristics of the active region (morphological structure, variations in sunspot magnetic fields, dynamics of development, etc.) were also analyzed in order to identify factors having the greatest effect on the flare activity. To acquire maximum information we used data from different levels of the solar atmosphere, obtained using both ground-based and space (SOHO, SDO, XRT, Hinode, etc.) observations.

**Ключевые слова:** Солнце, вспышки, активные области, магнитные поля

---

## 1 Введение

Вспышка является наиболее мощным проявлением солнечной активности. Вспышечный процесс сопровождается усилением ультрафиолетового и рентгеновского излучения, ускорением частиц до высоких энергий, выбросами плазмы с вмороженным в нее магнитным полем в межпланетное пространство и разогревом короны до  $10^8$  К.

Потоки жесткого рентгеновского и  $\gamma$ -излучения и высокоэнергичных частиц, достигая орбиты Земли, оказывают сильное влияние на околоземное пространство, биосферу и техносферу планеты.

Несмотря на достаточно длительное изучение вспышечных процессов на Солнце, модели, которая в полной мере описывала бы весь спектр наблюдаемых во время вспышки явлений, до сих пор не существует. Как следствие этого, не существует и достаточно надежных методов прогнозирования локализации, времени начала развития и пиковой мощности вспышечного процесса.

Объектом данного исследования являются вспышки класса X, наблюдавшиеся в текущем, 24 цикле активности Солнца. Цель работы – выявление динамических изменений в активной области, которые могут служить триггерным механизмом для дальнейшего развития вспышечного процесса соответствующей мощности.

## 2 Факторы, влияющие на вспышечную активность группы пятен

Еще в конце 50-х годов XX века было найдено, что:

1. Яркие узлы вспышек, которые появляются в самом начале вспышки, находятся вблизи нейтральной линии продольного магнитного поля и располагаются с двух сторон от линии раздела полярностей (Северный, 1958).
2. Вспышки появляются в областях сложной конфигурации с высоким градиентом магнитного поля (Северный, 1960).

В более поздних работах рассматривается связь вспышек с поперечными магнитными полями. Проведенные в Крыму тщательные исследования положения вспышек относительно поперечного магнитного поля (Зверева, Северный, 1970) показали, что вспышки возникают в областях с резким изменением направлений поперечных магнитных полей.

Одним из важнейших является вопрос о том, как вспышечная активность связана с характеристиками групп пятен. Результаты многочисленных исследований дают следующее:

1. Вспышки возникают не во всех группах пятен.
2. Существует слабая корреляция между частотой появления вспышек и общей площадью группы.
3. Вероятность появления вспышек, включая сильные, возрастает с продолжительностью существования групп (Алтынцев и др., 1982).

Наиболее мощные вспышки возникают чаще всего в группах пятен типа E и F по цюрихской классификации, разработанной Вальдмайером (Зирин, 1969).

Если проанализировать ранее опубликованные работы, в которых рассматриваются вопросы возникновения вспышек в активных областях, то можно выделить ряд характеристик, влияющих на активность группы в целом. Так, в работе Северного и др. (1979) как определяющие возникновение вспышки, рассмотрены следующие критерии:

1. высокие градиенты продольного магнитного поля;
2. области с аномальными поперечными магнитными полями;
3. нейтральная линия, параллельная солнечному экватору;
4. появление усов в спектре активной области;
5. относительная яркость факелов в линиях H $\alpha$  и K CaII;
6. вращательное движение группы пятен;
7. наличие групп-спутников;
8. появление новых пятен в группе.

Эти и ряд других критериев успешно использовались учеными-астрофизиками Советского Союза для прогнозирования возникновения в активной области вспышечного процесса еще в 70-х годах XX века.

## 3 Вспышки класса X в 24 цикле активности Солнца: общие статистические данные

Всего с момента начала 24 цикла солнечной активности (январь 2009 года) было зафиксировано 19 вспышек класса X. Первая мощная вспышка нового, 24 цикла активности Солнца произошла

15 февраля 2011 года в группе пятен AR11158 (рентгеновский класс X2.2). Самый сильный вспышечный процесс текущего цикла зафиксирован 9 августа 2011 года в группе AR11263 (рентгеновский класс X6.9). В ряде активных областей произошло более одной вспышки класса X: в группе AR11283 – две (06.09.2011 и 07.09.2011), AR11302 – две (22.09.2011 и 24.09.2011), AR11429 – две (05.03.2012 и 07.03.2012), AR11748 – четыре (две 13.05.2013 и по одной 14.05.2013 и 15.05.2013).

Если рассматривать количество вспышек X-класса по годам с начала 24 цикла активности Солнца, то цифры будут следующие: 2009 год – 0, 2010 – 0, 2011 год – 8, 2012 год – 7, 2013 год – 4 (по состоянию на конец августа 2013 года).

В целом вспышки 24 цикла заметно слабее, чем в предыдущем, 23 цикле активности Солнца (для сравнения: за пять лет, которые прошли с начала текущего цикла активности, самая мощная вспышка имела рентгеновский класс X6.9 (09.08.2011), а в 23-м цикле за такой же период времени – X9.4 (06.11.1997)).

## 4 Используемые данные

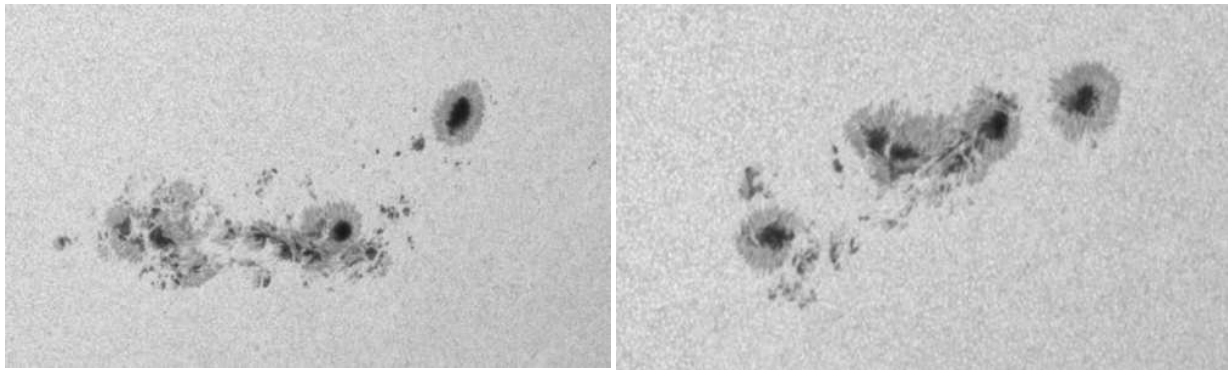
В ходе исследования использовались данные наблюдений следующих наземных и космических телескопов:

- SDO (прибор AIA): спектрогелиограммы  $\lambda 171 \text{ \AA}$  (Fe IX) и  $\lambda 193 \text{ \AA}$  (Fe XII/XIV) для изучения взаимодействия активных областей посредством корональных структур;
- SDO (прибор AIA): изображения Солнца в континууме в длине волны  $4500 \text{ \AA}$  для исследования движений отдельных пятен в группе, их возникновения или исчезновения, а также для изучения общего вида активной области на уровне фотосферы;
- SDO (прибор HMI): магнитограммы Солнца с целью анализа магнитных полей в фотосфере, всплывания новых потоков и взаимодействия отдельных активных областей;
- БСТ-2 НИИ “КрАО”: данные о напряженностях магнитных полей отдельных пятен в исследуемых группах;
- Данные, размещенные на сайте космической обсерватории Тесис (<http://www.thesis.lebedev.ru/>): общие характеристики групп пятен (долготная протяженность, количество пятен, их общая площадь, конфигурация магнитного поля), используемые для построения кривых развития активных областей.

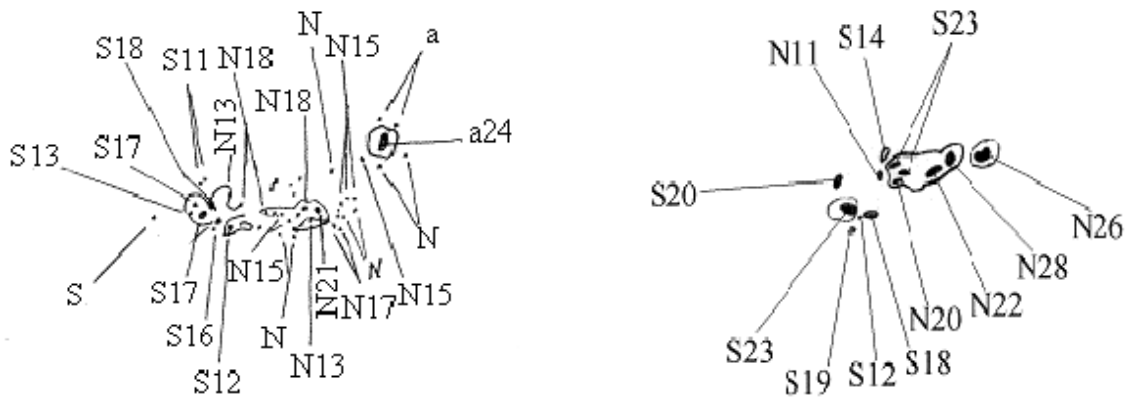
## 5 Некоторые особенности групп пятен, в которых зарегистрированы вспышки рентгеновского класса X

Проведя общий анализ данных по исследуемым активным областям, можно выделить ряд особенностей, которые в той или иной степени могут влиять на вспышечную активность группы пятен.

1. Для групп пятен, в которых возникают вспышки класса X, типичной является  $\delta$ -конфигурация магнитного поля. Тем не менее следует заметить, что далеко не все активные области, обладающие данной конфигурацией магнитного поля, могут произвести мощные вспышки. С начала 2009 года было отмечено 45 групп, в которых  $\delta$ -конфигурация наблюдалась по крайней мере один день. И лишь 11 из них (24 %) произвели вспышки X-класса. В отдельных же случаях мощные вспышки наблюдаются в группах с более простой  $\beta$ -конфигурацией магнитного поля. В текущем цикле солнечной активности две группы пятен, в которых были зафиксированы вспышки класса X, являлись простыми биполярными группами (AR11402 и AR11430).
2. У большинства групп  $\delta$ -конфигурация магнитного поля (в случае ее возникновения) наблюдается двое и более суток. В отдельных активных областях (в 24 цикле активности это AR11164, AR11166, AR11302, AR 11465)  $\delta$ -конфигурация наблюдалась дважды с интервалом в 24–72 часов, хотя ни в одном из случаев не было повторной вспышки класса X.



**Рис. 1.** Фотогелиограммы активных областей, полученные прибором HMI/SDO в континууме. Слева – группы пятен, в которых зафиксированы вспышки класса X: AR11515 05.07.2012 (слева), AR11158 16.02.2011 (справа). Хорошо заметна развитая центральная подгруппа пятен

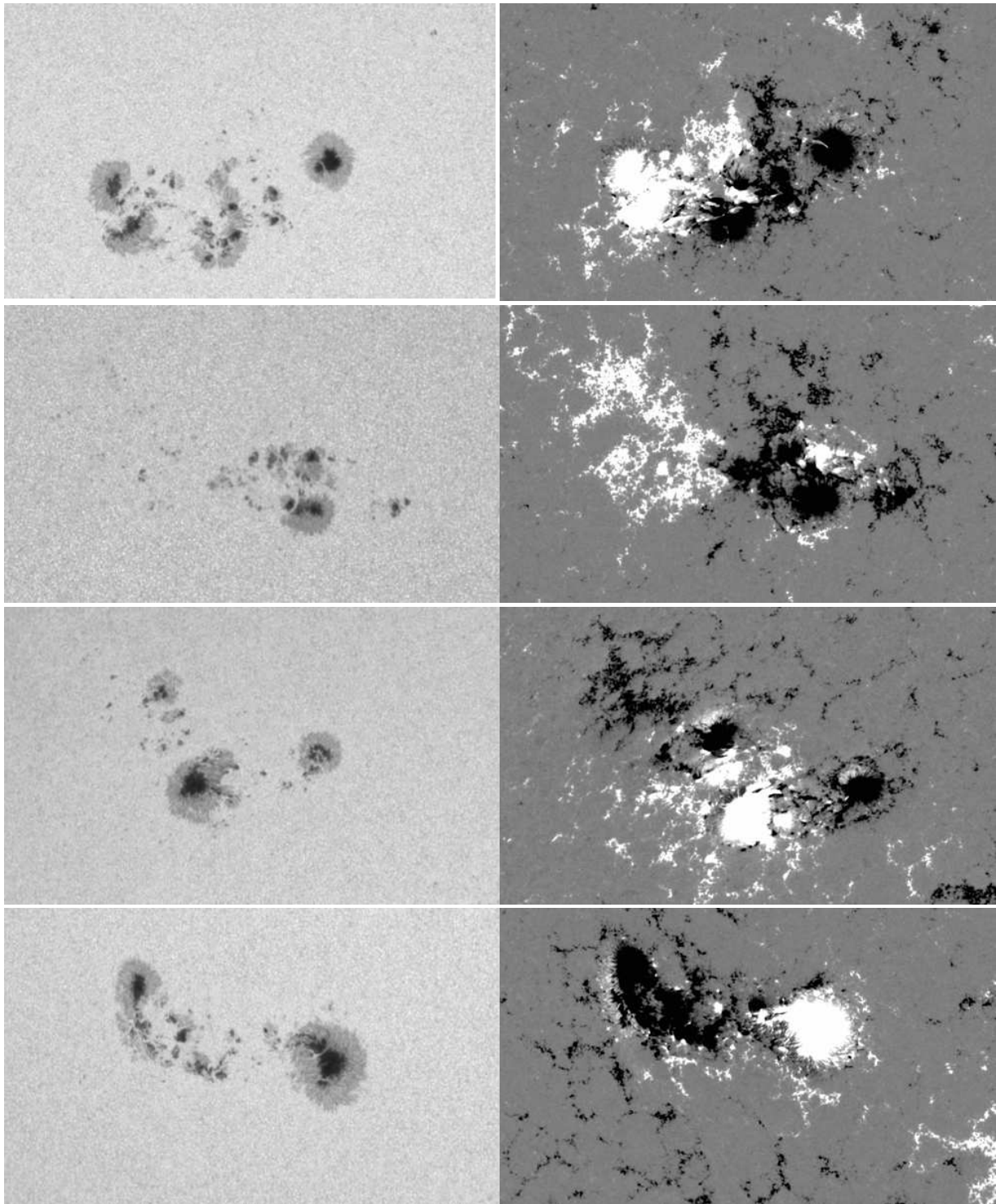


**Рис. 2.** Магнитные поля пятен активных областей AR11515 и AR11158, изображенных на рис. 1. Напряженность магнитного поля отдельных пятен превышает значение в 2000 Гс. Данные телескопа БСТ-2 НИИ “КрАО”

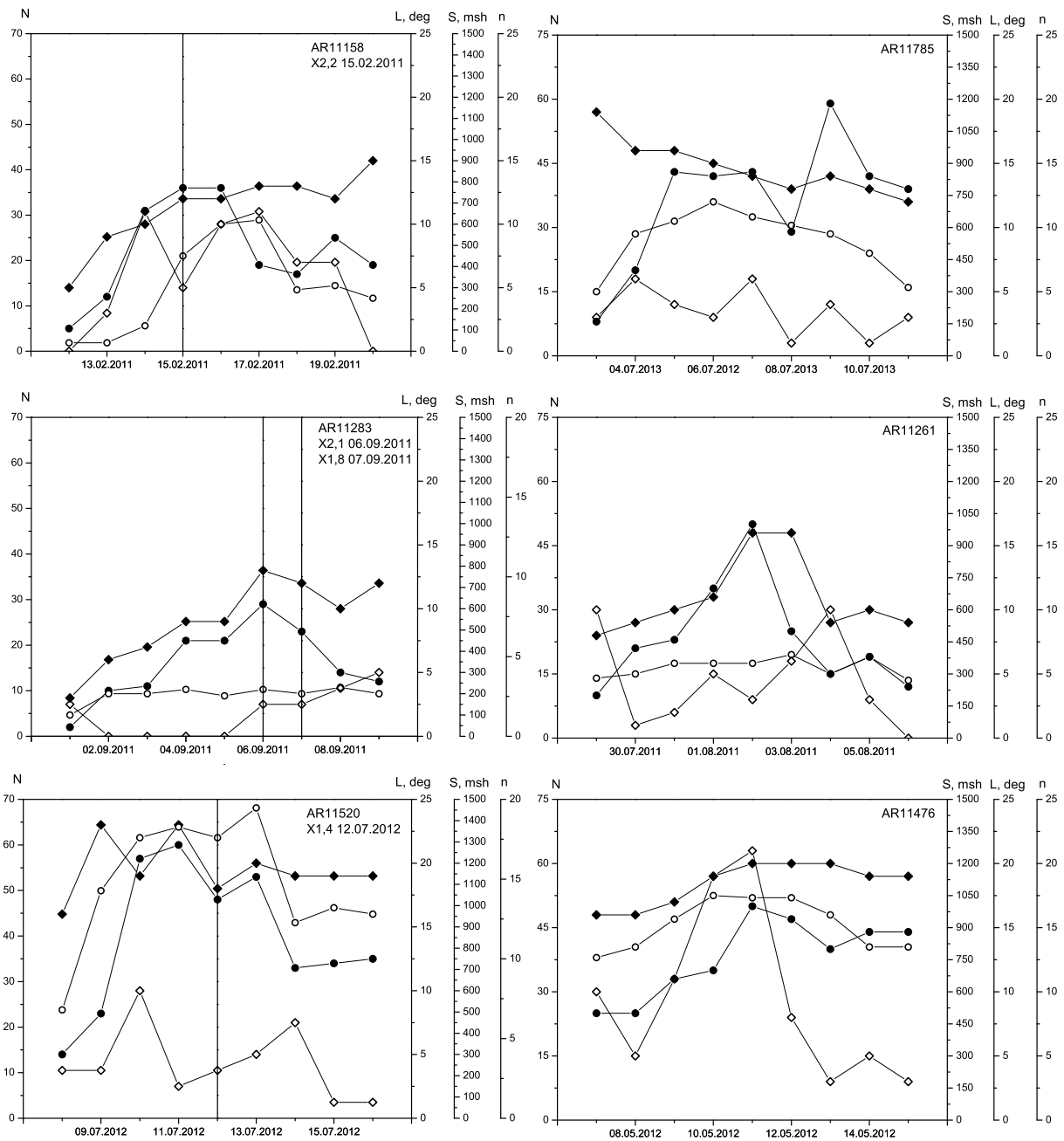
3. Группы пятен, в которых зафиксированы вспышки рентгеновского класса X, имеют характерный вид. Бросается в глаза наличие центральной подгруппы, которая состоит из большого числа неустойчивых пятен, часто имеющих неправильную форму (рис. 1). В таких подгруппах зафиксированы достаточно мощные магнитные поля, которые в отдельных пятнах могут превышать значение в 2000 Гс (рис. 2).

В то же время, если рассматривать фотогелиограммы и магнитограммы групп пятен, в которых произошли вспышки класса X, и групп, обладающих  $\delta$ -конфигурацией магнитного поля, в которых не наблюдались мощные вспышечные процессы, то можно выделить некоторые особенности (рис. 3). В частности, сразу же можно обратить внимание на отсутствие развитой центральной подгруппы пятен в активных областях, в которых вспышки класса X не наблюдались. При изучении магнитограмм хорошо видно, что мощные магнитные поля активных областей, в которых зарегистрированы мощные вспышечные процессы, находятся очень близко друг к другу. В группах, где мощные вспышки не происходят, такие поля разнесены в пространстве на достаточно большое расстояние. Это говорит о большой роли величины градиента магнитного поля во вспышечной эволюции активной области.

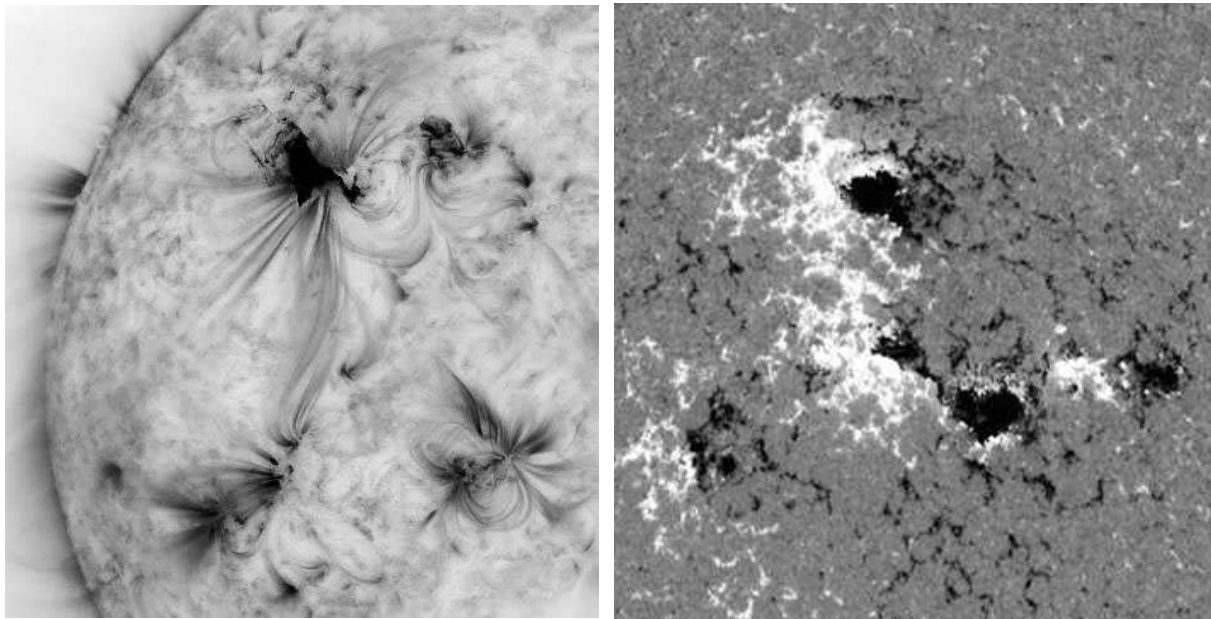




**Рис. 3.** Фотогелиограммы (слева), полученные прибором HMI/SDO в континууме, и магнитограммы (справа) активных областей. Сверху вниз – AR11166 09.03.2011 (вспышка X1.5 09.03.2011), AR11283 06.09.2011 (вспышка X2.1 06.09.2011), а также AR11164 02.03.2011, AR11504 14.06.2012, в которых мощные вспышечные процессы не зафиксированы. В активных областях AR11166 и AR11283 хорошо заметна развитая центральная подгруппа пятен



**Рис. 4.** Динамика развития активных областей. Рассмотрены изменения количества пятен в группах (кривые с точками), общей площади пятен (кривые с кружочками), долготной протяженности (кривая с зачерненными ромбиками) и количества вспышек в активной области (кривая с ромбиками). Слева – группы, в которых зафиксированы вспышки класса X, справа – группы с  $\delta$ -конфигурацией магнитного поля, в которых мощных вспышек не наблюдалось. Вертикальная линия на графиках слева отмечает день, в который наблюдалась вспышка рентгеновского класса X



**Рис. 5.** Слева – комплекс из трех активных областей AR11428/AR11429/AR11430, взаимодействующих посредством корональных структур. Данные получены прибором AIA/SDO ( $\lambda$  171 Å) 07.03.2012 года; справа – магнитограмма, отображающая общее магнитное поле комплекса AR11401/AR11402

4. Неустойчивость отдельных пятен группы, их объединение, распад, исчезновение, а также движения являются одним из определяющих факторов в перераспределении магнитных полей и дестабилизации активной области в целом, что приводит в конечном итоге к развитию вспышечного процесса. Этот вопрос освещен в целом ряде работ, в частности следует отметить следующие: Северный и Шапошникова (1954), Зирин и Лазарев (1975), Гневышев, Гневышева (1956) и др.

Динамика количества пятен в группе и их общей площади представлена на рис. 4. Из графиков видно, что вспышки класса X происходят вблизи максимума развития активной области. При этом группа не обязательно должна иметь большую площадь. В 24 цикле активности Солнца только две из 13 рассмотренных в данной работе групп имели в день вспышки общую площадь пятен более 1000 м. д. п. (AR11429 и AR11520). Это говорит о том, что общая площадь группы не является определяющим параметром, влияющим на вспышечную активность. То же можно сказать и об общем количестве пятен в активной области. Более четко можно связать возникновение сильных вспышек только с изменениями этих величин.

Из приведенных графиков также видно, что единственное отличие групп пятен с активностью X-класса от групп, в которых мощных вспышек зафиксировано не было, состоит в их разной долготной протяженности. Активные области, в которых зафиксированы вспышечные процессы класса X, на начальном этапе развития были достаточно компактными, что и определило их дальнейшую вспышечную эволюцию.

5. Взаимодействие групп пятен, их объединение в комплексы активности также является весьма важным фактором, в значительной степени влияющим на активность той или иной активной области.

С начала 24 цикла можно было наблюдать целый ряд комплексов. Следует обратить внимание на взаимодействие через корональные структуры в комплексе AR11428/AR11429/AR11430 (рис. 5), в котором сначала произошла вспышка класса X5.4 в AR11429 (начало 0:02 07.03.2012), а в 1:05 началась вспышка в AR11430 (рентгеновский класс X1.3), а также на комплексы

AR11401/AR11402 (рис. 5), AR11519/AR11520/AR11521, которые обладали общими магнитными полями.

## 6 Выводы

Проанализировав данные наблюдений различных источников с разных уровней атмосферы Солнца, можно сделать следующие выводы:

1. Главным определяющим фактором для возникновения сильных вспышек является сложное магнитное поле.
2. В 24 цикле активности Солнца только 24 % групп с  $\delta$ -конфигурацией магнитного поля продуцировали вспышки класса X.
3. Две активные области, в которых зафиксированы вспышки класса X (AR11402 и AR11430), имели  $\beta$ -конфигурацию магнитного поля.
4. Изучение фотогелиограмм и магнитограмм активных областей, в которых зафиксированы вспышки X-класса, дало возможность выделить некоторые их особенности, а именно: наличие развитой центральной подгруппы пятен с мощными магнитными полями и близкое расположение магнитных полюсов противоположной полярности. В группах пятен, где мощные вспышки не наблюдались, отсутствует развитая центральная подгруппа и магнитные полюса находятся на большом расстоянии друг от друга.
5. Исследование динамики активных областей показало, что явной корреляции между общей площадью или количеством пятен в группе и количеством и мощностью вспышек, зафиксированных в ней, не наблюдается. В то же время группы пятен, в которых зафиксированы вспышки класса X, на начальных этапах развития были более компактными, чем группы, в которых мощные вспышки не зафиксированы.
6. Одним из важных факторов, влияющих на вспышечную эволюцию активной области, является взаимодействие с другими группами с образованием комплексов активности посредством магнитных полей в фотосфере или корональных структур.

## Литература

- Алтынцев А.Т., Банин В.Г., Куклин Г.В., Томозов В.М. // Солнечные вспышки. М.: Наука. 1982. С. 75.
- Гневьшев М.Н., Гневьшева Р.С. // Солнечные данные. 1956. № 2. С. 122.
- Зверева А.М., Северный А.Б. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1970. Т. 41/42. С. 97.
- Зирин Г. // Солнечная атмосфера. М.: Мир. 1969. С. 383.
- Зирин, Лазарев (Zirin H., Lazareff B.) // Solar Phys. 1975. V. 41. № 2. P. 425.
- 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 и др. (Severny A.B., Stepanyan N.N., Steshenko N.V.) // Solar-Terrestrial Prediction Proceedings. V. 1. Prediction group report. Boulder. Space Environment Laboratory. 1979. P. 72.
- Северный А.Б., Шапошникова Е.Ф. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1954. Т. 12. С. 3.