

УДК 523.985

Пространственные и временные особенности поведения микроволнового и ультрафиолетового излучения в эруптивных событиях

И.А. Бакунина¹, В.Ф. Мельников², А.В. Шаин², В.Е. Абрамов-Максимов², А.С. Моргачев³

¹ Национальный исследовательский университет “Высшая школа экономики”, ул. Б. Печерская, 25/12, Нижний Новгород, 603155, Россия

rinbak@mail.ru

² Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Пулковское шоссе, 65/1, Санкт-Петербург, 196140, Россия

³ ННГУ им. Лобачевского, пр. Гагарина, 23, Нижний Новгород, 603022, Россия

Поступила в редакцию 1 ноября 2021 г.

Аннотация. На сегодняшний день не вполне ясны наблюдательные признаки, определяющие способность активной области вызывать выброс вещества в высокие слои солнечной короны (coronal mass ejection – CME). Это затрудняет понимание физического механизма триггера CME. Данная работа посвящена поиску наблюдательных признаков, которые могут указывать на возникновение эруптивного процесса. Для этого мы провели сравнительный анализ условий до вспышки и во время вспышки для вспышечных событий, как сопровождаемых, так и не сопровождаемых CME. Мы изучили особенности пространственной и временной динамики микроволнового и ультрафиолетового излучений (данные радиогелиографа Нобейма, SDO/AIA), а также магнитных полей (SDO/HMI) для 16 активных областей (АО). На этой выборке установлено, что вспышки, сопровождающиеся CME, чаще всего возникают в открытых магнитных конфигурациях, в областях со скрученными магнитными жгутами и со всплывающими потоками. CME также наблюдаются чаще всего во вспышках большей длительности и в тех АО, которые имеют более протяженные по площади источники в микроволновом излучении.

Ключевые слова: Солнце, солнечные вспышки, корональные выбросы масс, микроволновое излучение, ультрафиолетовое излучение

1 Введение

Важной задачей исследований солнечной активности является поиск теоретических и наблюдательных признаков, определяющих способность активной области (АО) вызывать эрупцию вещества в высокие слои солнечной короны. В настоящее время существует уже достаточно много идей и моделей, объясняющих механизм возникновения эрупций в активных областях и последующих корональных выбросов масс (CME). Самая известная из них, так называемая “Стандартная модель вспышки”, или CSHKP model (Carmichael, 1964; Sturrock, 1966; Hirayama, 1974; Kopp and Pneuman, 1976), предполагает присутствие магнитных жгутов (magnetic flux ropes – MFR) в короне АО как предпосылку для инициирования эруптивных вспышек. MFR распознается как набор силовых линий магнитного поля, которые закручены вокруг центральной оси более одного раза (Gibson et al., 2006). Однако точный механизм образования магнитного жгута все еще неясен и спорен. Их образование обычно связывают а) со всплыванием скрученных магнитных жгутов и их длительным (сутки и более) существованием под магнитными аркадами (см., например, Solov’ev, 2021), а также б) с накоплением магнитной энергии в области линии инверсии магнитной полярности (Polarity Inversion Line – PIL) в результате вращения пятен в АО и/или относительного сдвига (“шира”) слоев фотосферы вдоль PIL. При этом считается, что жгуты образуются в результате пересоединения потока вдоль PIL (van Ballegooijen and Martens, 1989).

С помощью наблюдений MFR были идентифицированы в виде различных солнечных элементов, таких как волокна, каналы волокон, горячие корональные каналы и корональные сигмиды. В то время как волокна и каналы волокон наблюдаются в хромосферных линиях поглощения, сигмиды и горячие каналы наблюдаются в деталях линий излучения солнечной короны. Сигмиды – это структуры в форме буквы S (или перевернутой S), которые наблюдаются на изображениях Солнца в мягком рентгеновском (SXR) и крайнем ультрафиолетовом (EUV) диапазонах (Rust and Kumar, 1996; Manoharan et al., 1996). Волокна и горячие каналы – разные наблюдательные проявления MFR, лежащие на хромосферной и корональной высотах соответственно (Cheng et al., 2014a, b). Однако наиболее важной особенностью горячих каналов и корональных сигмидов является их частая связь с СМЕ, что было представлено в нескольких тематических исследованиях и статистических обзорах (см., например, Canfield et al., 1999, 2007; Nindos et al., 2015). Далеко не всегда всплывающие магнитные потоки являются обязательным условием вспышек с эрупциями (Romano et al., 2015). Решающим фактором оказывается монотонное увеличение магнитной спиральности (magnetic helicity), которая аккумулируется в короне. То есть шировые движения приносят больше магнитной энергии в последующие эруптивные события, чем всплывающие потоки.

Ранее в наших работах (Bakunina and Melnikov, 2019; Bakunina et al., 2020a, b) мы исследовали эруптивные и неэруптивные (без СМЕ) вспышки класса М. Мы обнаружили появление за несколько часов до вспышек пересекающихся друг с другом ярких и “горячих” ($T \sim 10^7 K$) петель в EUV-диапазоне (94 и 131 Å), которые мы назвали “Х-структуры”. Именно в этом месте затем инициируется вспышка. Также мы обнаружили, что максимум в интенсивности радиоизлучения на частоте 17 ГГц (данные NoRH) совпадает пространственно с Х-структурой, и перед вспышкой наблюдается сильная нестационарность поведения радиоизлучения.

Известно, что АО или конкретная вспышка в ней может быть эруптивной, но при этом не возникает СМЕ, и тогда эти события в литературе обычно называют confined. Здесь возникает путаница с применением термина “неэруптивная” вспышка. В дальнейшем мы будем использовать каталог вспышек NOAA, Space Weather Prediction Center (SWPC), и будем разделять вспышки на confined (C) и вспышки с СМЕ (E). Но те confined-вспышки, где была отмечена в каталоге эрупция, будем отмечать значком CE.

Целью данной работы является продолжение поисков отличий событий с СМЕ и confined на выборке из 16 АО, в которую вошли также ранее подробно исследованные нами события.

2 Наблюдения

2.1 Данные наблюдений и метод обработки

Анализ пространственной динамики микроволнового излучения активных областей выполнен на основе радиокарт Солнца, полученных на радиогелиографе Нобейма (NoRH) на частоте 17 ГГц с двумерным пространственным разрешением $10''$ – $15''$, с временным интервалом между изображениями 10 минут и 3 минуты, и на основе данных наблюдений SDO/AIA в крайнем ультрафиолетовом (EUV) диапазоне 94 и 131 Å с пространственным разрешением $\sim 1.5''$, а также данных наблюдений фотосферного магнитного поля на SDO/HMI. Для нелинейной бессиловой экстраполяции магнитных полей в корону АО мы воспользовались алгоритмами, приведенными в работе Wiegelmann (2004), и доступным на GitHub программным обеспечением, разработанным С.А. Анфиногентовым¹ и А.Г. Ступишиным².

Мы исследовали 16 АО в предвспышечной фазе перед событиями confined (C), confined с эрупцией (CE) (всего 8) и события с СМЕ (E) (всего 8). Из них 11 вспышек были выбраны из Duan et al. (2019) и исследованы нами ранее (Bakunina et al., 2021). Все события относятся к периоду 2011–2017 гг. В выборку вошли только те события, время наблюдения которых попало в интервал наблюдений радиогелиографа Нобейма (22:50–06:20 UT). Также мы исследовали только вспышки рентгеновского класса М (GOES). В таблице 1 представлены параметры вспышек и те наблюдательные признаки, которые, по нашему мнению, могут быть значимы в предсказании возможности осуществления события с СМЕ (последние четыре столбца).

¹ https://github.com/Sergey-Anfinogentov/GXBox_prep (дата доступа 15 октября 2021 г.).

² https://github.com/Alexey-Stupishin/Magnetic-Field_Library (дата доступа 15 октября 2021 г.).

Таблица 1. Основные характеристики выбранных для исследования событий

Date	Flare time	Flare class	NOAA	Flare position	Flare position (над пятном или вблизи пятна (S), в межпятенной зоне (IS))	Тип события	Наличие сигмоида	Всплывающий поток	Наличие открытых магнитных конфигураций	Площадь радиоисточника до вспышки (arcsec ²)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
2011-07-30	(02:09) 02:07:22 02:17:16 D=10	M9.3	11261	N16E19	IS	C ³	нет	нет	Есть, хвостовая часть АО, там же – СН ⁴	15000
2011-10-02 ⁵	(00:50) 00:41:54 00:43:34 01:51:03 D=69	M3.9	11305	N09W12	S (южная часть пятна)	CE	нет	нет	Есть, северная часть пятна	12500
2012-05-10	(04:18) 04:15:11 04:15:31 04:21:14 D=6	M5.7	11476	N13E22	IS	C	нет	нет	Есть, хвостовая часть АО, там же – СН	18750
2013-11-03	(05:22) 05:19:57 05:21:38 06:30:00 D=10	M5.0	11884	S12W16	IS	C	нет	нет	нет	18750
2014-02-04	(04:00) 03:49:38 03:50:27 04:28:59 D=39	M5.2	11967	S14W06	S (левее хвостового пятна)	CE	есть	нет	Есть, головная часть АО	22500
2011-09-25	(02:33) 02:29:06 02:32:35 02:37:20 D=8	M4.4	11302	N13E48	IS	CE	нет	нет	Есть, хвостовая зона, в хвостовой части – СН	30000
2014-10-22	(01:59) 01:17:41 01:39:12 03:25:43 D=128	M8.7	12192	S12E21	S (северная часть хвостового пятна)	C	есть	нет	Есть, южная часть хвостового пятна	30000
2017-09-04	(05:49) 05:37:18 05:39:15 06:29:59 D=52	M1.2	12673	S10W05	S (южная часть нового пятна)	CE	есть	есть	нет	12500
2011-09-06	(01:50) 01:42:10 01:44:28 02:45:00 D=63	M5.3	11283	N14W07	S (голова)	E	нет	нет	Есть, в головной части АО, и вблизи нее есть СН	39375
2012-01-23	(03:59) 01:36:44 03:50:32 06:06:51 D=270	M8.7	11402	N28W21	IS (севернее голов. пятна)	E	есть	есть	Есть, (центр. АО, северная часть)	60000
2012-03-09	(03:53) 03:24:55 03:38:39 04:48:01 D=83	M6.3	11429	N15W03	Нет магнитограммы (анти-Хейл)	E	есть	нет	Есть, в хвостовой части АО – СН	45000

³ E – eruptive, C – confined, CE – confined with eruption.⁴ СН – наличие корональной дыры вблизи АО.⁵ Есть публикация, в которой сообщается о CME в результате этой вспышки (Krista and Reinard, 2013).⁶ Это событие произошло между NOAA 12173 и 12172.

Таблица 1. Продолжение

Date	Flare time	Flare class	NOAA	Flare position	Flare position (над пятном или вблизи пятна (S), в межпятенной зоне (IS))	Тип события	Наличие сигмоида	Всплывающий поток	Наличие открытых магнитных конфигураций	Площадь радиоисточника до вспышки (arcsec ²)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
2013-10-24	(00:28) 00:26:05 00:27:56 00:43:27 D=17	M9.3	11877	S10E08	IS (Левее и севернее хвостового пятна, между АО 11877 и 11879)	E	нет	есть	Есть, но в головной части АО	33750
2014-09-28 ⁶	(02:58) 02:32:35 02:43:10 03:24:33 D=53	M5.1	12173	S13W23	S (южная часть), левее находится 12172)	E	есть	нет	Есть, хвостовая часть АО 12172 и южная часть АО 12173	30000
2014-12-17	(04:42) 04:03:11 04:32:08 06:29:59 D=146	M8.7	12242	S20E09	S (южная часть)	E	есть	есть	Есть, хвостовая часть АО	30000
2011-08-02	(06:19) 05:35:41 06:08:56 06:30:02 D=55	M1.4	11261	N17W10	S – левый край хвостового пятна (открытая конфигу- рация)	E	нет	нет	Есть, (хвостовая часть и центр АО, левее хвостовой части – СН	35000
2015-06-21	(Нет PRF) 01:26:48 01:36:13 05:12:13 D=225	M2.6	12371	N13E14	Нет магнито- граммы	E	есть	есть	Есть, хвостовая часть, рядом с АО (головная часть) есть СН	35000

В таблице 1 в первой, второй и третьей колонках соответственно приведены данные о дате, времени вспышки в радиоизлучении (по данным NoRH) и ее рентгеновском балле. В крайней правой колонке – характерная площадь радиоисточника на частоте 17 ГГц в arcsec² (при аппроксимации прямоугольником, измерялась в пикселях, затем умножалась на 25 (площадь пикселя 4.9'' × 4.9'')). Ошибки измерений площади радиоисточников определяются полушириной диаграммы направленности (~ 5''–10'' на 17 ГГц) и в среднем составляют порядка 15–20 % или менее от площади радиоисточника.

Во второй колонке в скобках приведено время пика вспышки согласно SWPC (верхняя строка), ниже – время начала T_{start} , максимума T_{peak} и окончания T_{end} вспышки на частоте 17 ГГц (данные NoRH), последняя строчка в каждой ячейке – длительность вспышки (D) на частоте 17 ГГц.

В шестой колонке показаны результаты отождествления координат пика яркости в радиоизлучении с магнитограммой SDO/HMI. Седьмая колонка – типы событий, которые определялись согласно каталогу вспышек SWPC и таблице, опубликованной в Duan et al. (2019).

В колонках 8, 9, 10 таблицы 1 использованы данные Heliophysics Events Knowledgebase⁷ (НЕК). О наличии открытой магнитной конфигурации в АО и корональных дырах рядом с ней можно судить по изображениям на 211, 193 и 171Å, наложенным на одну карту (изображения доступны на SolarMonitor⁸, алгоритм – на GitHub⁹).

⁷ <https://www.lmsal.com/isolsearch>

⁸ <https://www.solarmonitor.org/>

⁹ <https://github.com/TCDSolar/CHIMERA>

2.2 Анализ параметров таблицы 1

Из анализа второго столбца таблицы 1 для двух подвыборок данных можно сделать вывод, что события с СМЕ имеют более продолжительные вспышки в радиоизлучении на частоте 17 ГГц. Для наглядности длительность вспышек в радиодиапазоне представлена в виде гистограмм на рисунках 1 и 2. Из последнего столбца таблицы 1 также следует, что площади радиоисточников в спокойной

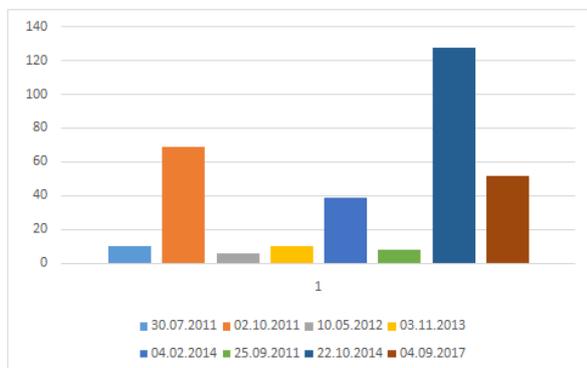


Рис. 1. Диаграмма распределения длительности вспышек (в минутах) на частоте 17 ГГц для событий confined. За исключением двух событий из восьми, длительность вспышек не превышает 60 минут

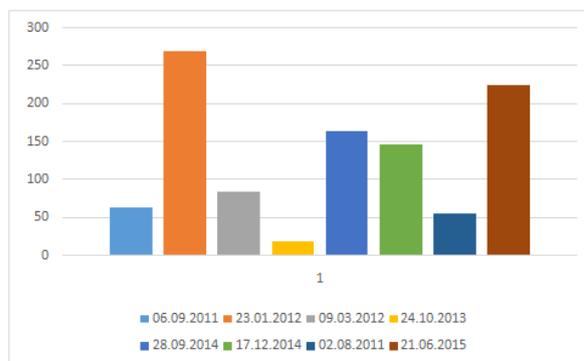


Рис. 2. Диаграмма распределения длительности вспышек (в минутах) на частоте 17 ГГц для событий с СМЕ. За исключением двух событий из восьми, длительность вспышек превышает 60 минут

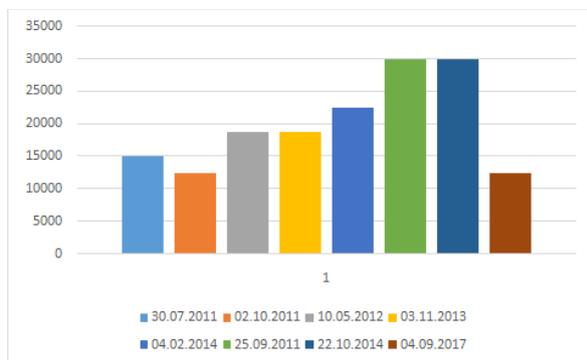


Рис. 3. Диаграмма распределения аппроксимированной площади радиоисточников в предвспышечной фазе на частоте 17 ГГц в arcsec² (вертикальная ось) для событий confined

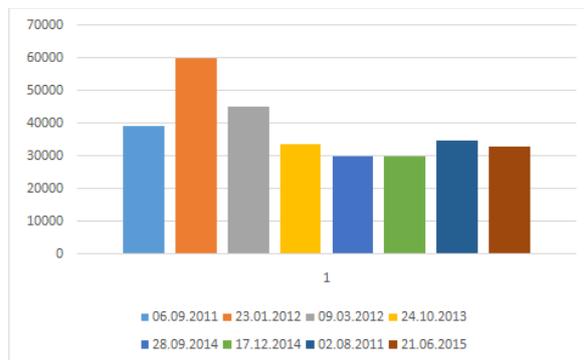


Рис. 4. Диаграмма распределения аппроксимированной площади радиоисточников в предвспышечной фазе на частоте 17 ГГц в arcsec² (вертикальная ось) для событий с СМЕ

фазе больше в событиях с СМЕ. Для наглядности это отображено на диаграммах рисунков 3 и 4. Из диаграмм видно, что площади радиоисточников для всех событий с СМЕ явно превышают 30000 arcsec², тогда как для событий confined все площади меньше 30000 arcsec² (в двух случаях равны 30000 arcsec²).

Таким образом, исходя из нашей выборки данных мы можем сделать вывод, что для событий с СМЕ характерна в среднем большая, чем для событий confined, продолжительность вспышек и более протяженные радиоисточники, а следовательно, более обширные системы магнитных петель.

2.3 Анализ параметров таблицы 1 (продолжение): пример пространственной динамики микроволнового и EUV-излучения

Анализируя 8-ю и 9-ю колонки таблицы 1, отметим, что сигмиды есть в трех из восьми событий confined и в пяти из восьми событий с СМЕ. Всплывающие потоки есть в одном из восьми событий

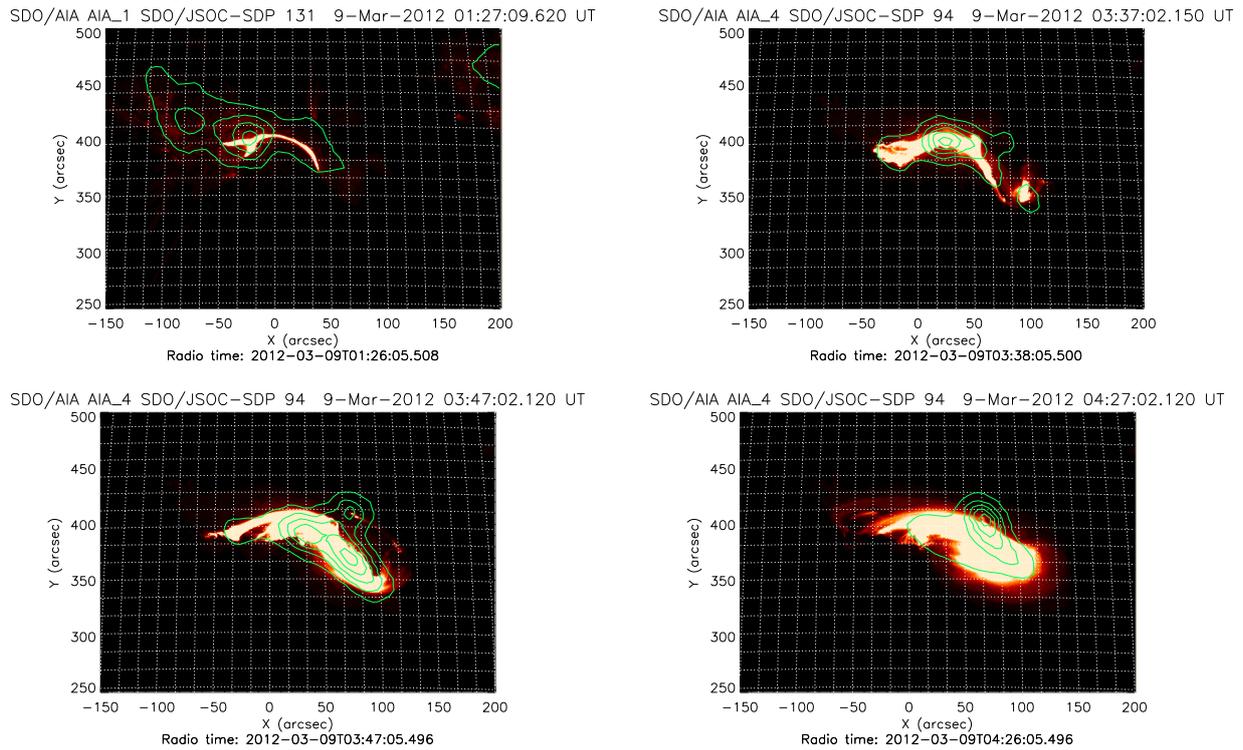


Рис. 5. Пример сигмоидной структуры в АО 11429 9 марта 2012 г. Наложение интенсивности радиоизлучения на частоте 17 ГГц (I, контуры) на карту EUV 131 и 94 Å (фон)

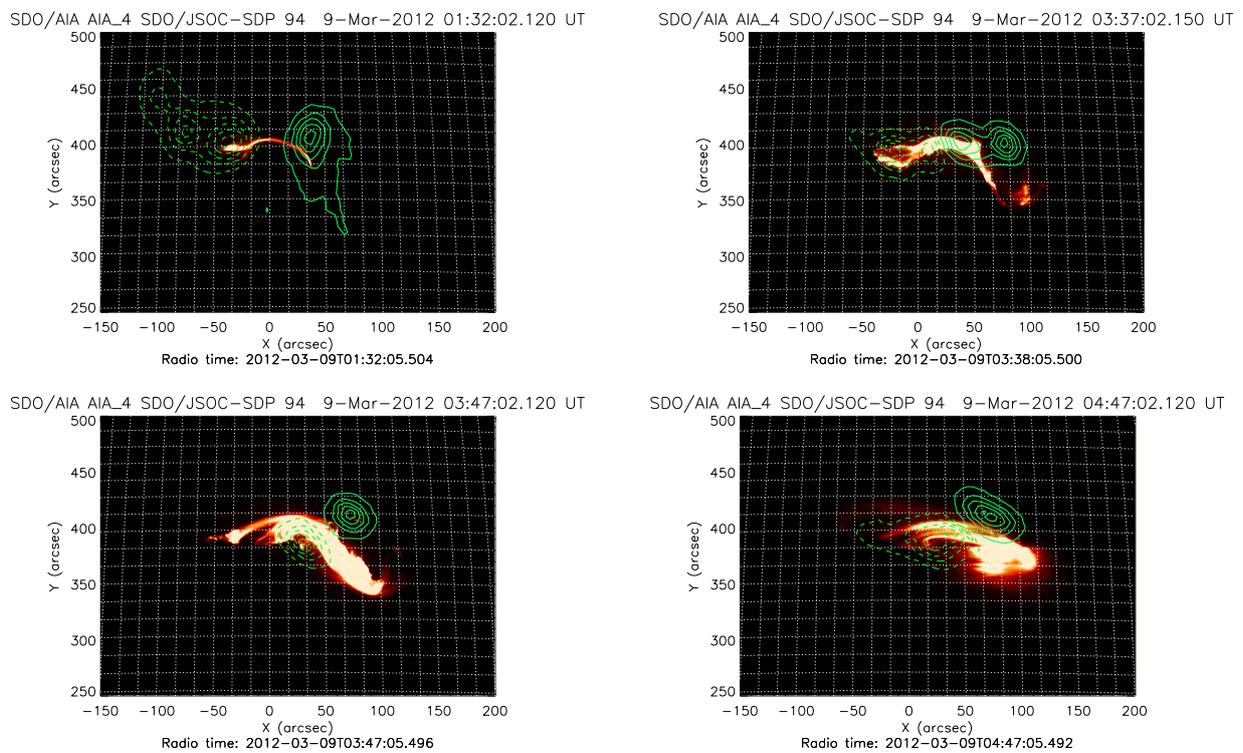


Рис. 6. Пример сигмоидной структуры в АО 11429 9 марта 2012 г. Наложение круговой поляризации радиоизлучения на частоте 17 ГГц (V, контуры) на карту EUV 94 Å (фон)

confined и в четырех из восьми событий с СМЕ. Выборка у нас не очень большая, но все же можно сделать вывод, что всплывающие потоки и сигмоиды чаще регистрируются в событиях с СМЕ.

В качестве иллюстрации присутствия сигмоида приведем пример наложения контуров распределения интенсивности и круговой поляризации радиоизлучения (17 ГГц) на двумерные карты SDO/AIA в EUV на 94 и 131 Å для события с СМЕ в АО 11429 9 марта 2012 г. (рис. 5 и 6) перед вспышкой M6.3 ($T_{\text{start}} = 03:24:55$, $T_{\text{peak}} = 03:38:39$, $T_{\text{end}} = 04:48:01$) и во время вспышки. Отметим, что это единственная АО в нашей выборке с антихейловской ориентацией магнитного поля.

Из пространственной динамики, представленной на изображениях, мы видим, что примерно за два часа до начала вспышки наблюдается скрещенная структура в EUV, на которую приходится максимум радиояркости в интенсивности. При этом на концах сигмоида наблюдаются поляризованные микроволновые источники с разным знаком круговой поляризации (левая верхняя панель рисунка 6). В процессе вспышки возникает петля в радиоизлучении, поперечная сигмоиду, возможно, структурно связанная с выходом эрупции за пределы магнитного поля АО в качестве СМЕ.

2.4 Анализ параметров таблицы 1 (продолжение). Структура магнитного поля на корональных высотах

Анализируя 6-ю и 10-ю колонки таблицы 1 совместно, можно сделать вывод, что в целом как для событий confined, так и для событий с СМЕ характерно наличие в той или иной части АО открытых магнитных конфигураций и присутствие вблизи некоторых АО в обеих подвыборках корональных дыр. Но в событиях с СМЕ вспышка локализуется вблизи таких открытых магнитных конфигураций (и корональных дыр). В отличие от них, в событиях типа confined вспышка происходит либо в межпятенной зоне, либо в тех частях АО, где отсутствуют открытые магнитные структуры и корональные дыры; в обоих случаях возможная эрупция, вероятно, удерживается внутри замкнутой структуры магнитного поля АО.

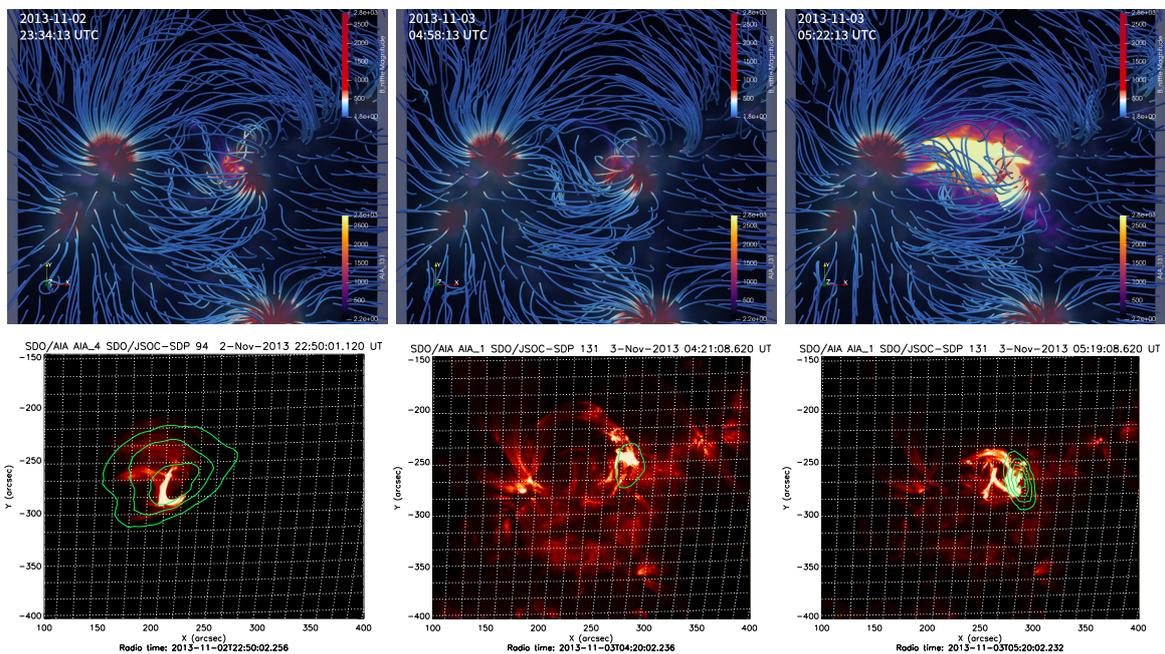


Рис. 7. Экстраполяция магнитного поля в корону АО 11884 (верхняя панель, линии) до и во время вспышки M4.9 3 ноября 2013 г. ($T_{\text{start}} = 05:19$, $T_{\text{peak}} = 05:21$, $T_{\text{end}} = 06:30$ UT). Величина магнитного поля на фотосфере показана цветом (верхняя шкала). Фоном показана яркость EUV-излучения в линии 131 Å (цвет, нижняя шкала). На нижней панели показано наложение радиоизлучения на частоте 17 ГГц в интенсивности (контур) на EUV-изображения в линиях 94 и 131 Å (фон)

Для иллюстрации этого явления мы провели нелинейную бессиловую экстраполяцию (NLFFF extrapolation) магнитных полей в корону АО для двух событий из двух подвыборок по алгоритмам,

указанным в разделе 2.1. Одно из событий относится к confined – вспышка M4.9, которая происходит в АО 11884 (03.11.2013), как видно из таблицы 1, в межпятенной области при отсутствии открытых магнитных конфигураций. Другое событие – вспышка M5.1 (28.09.2014), сопровождающаяся СМЕ, происходит в открытой магнитной конфигурации в южной части АО 12173, соседствующей с АО 12172.

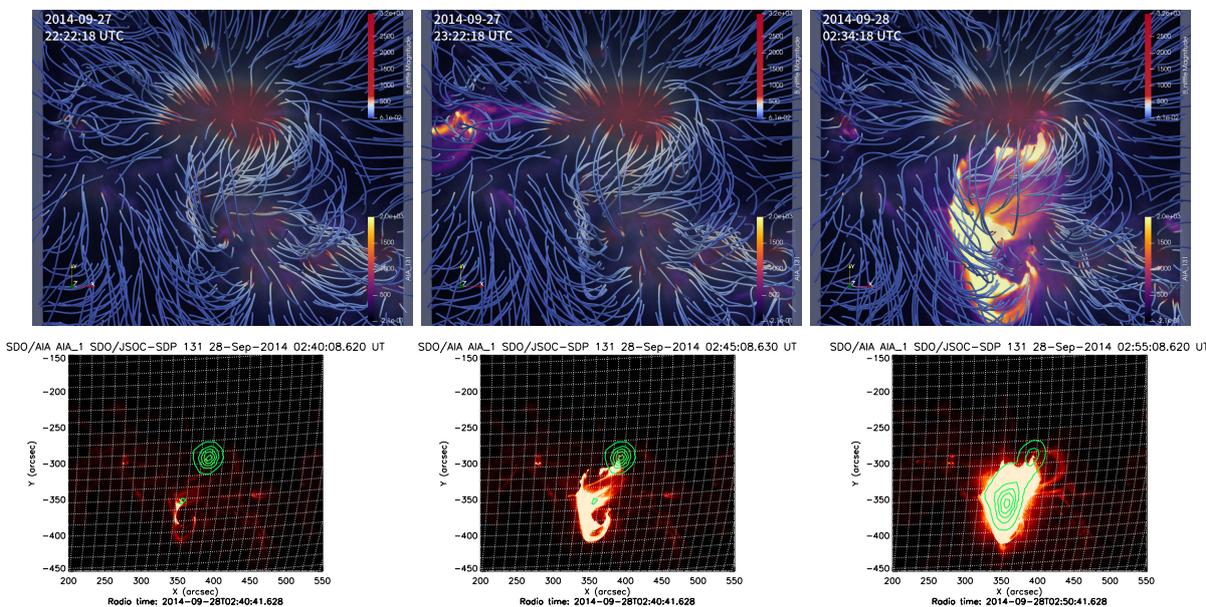


Рис. 8. Экстраполяция магнитного поля в корону АО 12173 (верхняя панель, линии) до и во время вспышки M5.1 28 сентября 2014 г. ($T_{\text{start}} = 02:32$, $T_{\text{peak}} = 02:43$, $T_{\text{end}} = 03:24$ UT). Величина магнитного поля на фотосфере показана цветом (верхняя шкала). Фоном показана яркость EUV-излучения в линии 131 \AA (цвет, нижняя шкала). На нижней панели показано наложение радиоизлучения на частоте 17 ГГц в круговой поляризации (контуры) на EUV-изображения в линиях 94 и 131 \AA (фон)

На рис. 7 показана эволюция магнитного поля в АО 11884, ультрафиолетового (131 и 94 \AA) и радиоизлучения (17 ГГц) в интенсивности до и во время вспышки класса M4.9 3 ноября 2013 г. ($T_{\text{start}} = 05:19$, $T_{\text{peak}} = 05:21$, $T_{\text{end}} = 06:30$ UT) без эрупции при магнитной конфигурации бета-гамма. На верхних панелях видно, что за 2–3 часа до вспышки между двумя соседними пятнами, соединенными магнитными арками силовых линий, прямо под ними и почти перпендикулярно к ним сформировался мощный изогнутый жгут магнитного поля (левая и средняя панели). Именно здесь началась вспышка, проявившая себя в виде возгорания скрещенных КУФ-петель (правая панель). На эту же область приходится максимум яркости радиоизлучения в интенсивности на частоте 17 ГГц (нижняя панель). Вспышка происходит в межпятенной области, в закрытой конфигурации магнитного поля, которая отчетливо видна на изображениях верхней и нижней панелей.

Мы рассмотрели также вспышку M5.1 28.09.2014, сопровождавшуюся выбросом СМЕ, который происходил между двумя активными областями АО 12173 и АО 12172. Они проходили по диску Солнца с 21.09.2014 по 04.10.2014 с магнитной конфигурацией в основном бета-гамма, причем АО 12172 произвела 12 вспышек класса C и одну класса M, а АО 12173 – всего одну вспышку класса M.

На рис. 8 показана эволюция магнитного поля в АО 12173, EUV (131 и 94 \AA) и радиоизлучения (17 ГГц) в интенсивности до и во время вспышки M5.1 28 сентября 2014 г. ($T_{\text{start}} = 02:32$, $T_{\text{peak}} = 02:43$, $T_{\text{end}} = 03:24$ UT) с СМЕ также при магнитной конфигурации бета-гамма, как и в первом рассмотренном случае. Однако здесь вспышка происходит в южной части АО 12173, в открытой конфигурации магнитного поля. На верхних панелях видно, что уже за 4 часа до вспышки в том месте, где она будет происходить (правая верхняя панель), формируется скрученный магнитный жгут (левая и средняя панели). На нижней панели показана эволюция радиоисточника в интенсивности на частоте 17 ГГц (контуры) с наложением на EUV 131 \AA . Видно, что магнитный жгут

сформировался южнее циклотронного источника над главным пятном АО 12173, где наблюдается впоследствии максимум радиояркости (нижняя правая панель) и, вероятно, происходит эрупция.

3 Выводы

По наблюдениям на радиогелиографе Нобейма (17 ГГц), SDO/AIA и SDO/HMI мы проанализировали 16 активных областей, из которых в 8 АО наблюдались СМЕ.

Выявлено, что СМЕ преимущественно инициируются в событиях с открытыми магнитными конфигурациями, при наличии скрученных магнитных жгутов, сигмоидов, всплывающих магнитных потоков. Длительность вспышек, а также площадь радиоисточников в предвспышечных фазах в таких событиях в среднем больше, чем в событиях confined.

События confined отличаются наличием закрытой структуры силовых линий над областью вспышки (магнитным жгутом), что не позволило произвести выбросы вспышечной плазмы высоко в корону.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ-ЧНФ № 20-52-26006

Литература

- Bakunina I.A., Melnikov V.F., 2019. *Astron. Astrophys. Trans.*, vol. 31, no. 3, pp. 251–266.
- Bakunina I.A., Melnikov V.F., Morgachev A.S., 2020a. *Astrofizika*, vol. 63, no. 2, pp. 252–259.
- Bakunina I.A., Melnikov V.F., Morgachev A.S., 2020b. *Geomagn. Aeron.*, vol. 60, no. 7, pp. 853–859.
- Bakunina I.A., Melnikov V.F., Abramov-Maximov V.E., Morgachev A.S., 2021. *Geomagn. Aeron.*, vol. 61, no. 8, in press.
- Canfield R.C., Hudson H.S., McKenzie D.E., 1999. *Geophys. Research Lett.*, vol. 26, pp. 627–630.
- Canfield R.C., Kazachenko M.D., Acton L.W., et al., 2007. *Astrophys. J.*, vol. 671, pp. L81–L84.
- Carmichael H., 1964. In Wilmot N.H. (Ed.), *A process for flares*. Washington, DC: National Aeronautics and Space Administration, Science and Technical Information Division, pp. 451–456.
- Cheng X., Ding M.D., Zhang J., et al., 2014a. *Astrophys. J.*, vol. 789, id. 93.
- Cheng X., Ding M.D., Zhang J., et al., 2014b. *Astrophys. Lett.*, vol. 789, id. L35.
- Duan A., Jiang C., He W., et al., 2019. *Astrophys. J.*, vol. 884, id. 73.
- Hirayama T., 1974. *Solar Phys.*, vol. 34, pp. 323–338.
- Gibson S.E., Fan Y., Török T., Kliem B., 2006. *Space Sci. Rev.*, vol. 124, pp. 131–144.
- Kopp R.A., Pneuman G.W., 1976. *Solar Phys.*, vol. 50, pp. 85–98.
- Krista L.D., Reinard A., 2013. *Astrophys. J.*, vol. 762, id. 91.
- Manoharan P.K., van Driel-Gesztelyi L., Pick M., Demoulin P., 1996. *Astrophys. Lett.*, vol. 468, pp. L73–L76.
- Nindos A., Patsourakos S., Vourlidis A., Tagikas C., 2015. *Astrophys. J.*, vol. 808, id. 117.
- Romano P., Zuccarello F., Guglielmino S.L., 2015. *Astron. Astrophys.*, vol. 582, article id. A55.
- Rust D.M., Kumar A., 1996. *Astrophys. Lett.*, vol. 464, pp. L199–L202.
- Solov'ev A.A., Kirichek E.A., 2021. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, vol. 505, pp. 4406–4416.
- Sturrock P.A., 1966. *Nature*, vol. 211, pp. 695–697.
- van Ballegooijen A.A., Martens P.C.H., 1989. *Astrophys. J.*, vol. 343, pp. 971–984.
- Wiegmann T., 2004. *Solar Phys.*, vol. 219, pp. 87–108.

Spatial and temporal features of the behavior of microwave and ultraviolet emission in eruptive events

*I.A. Bakunina*¹, *V.F. Melnikov*², *A.V. Shain*², *V.E. Abramov-Maximov*², *A.S. Morgachev*³

¹ HSE University, Bolshaya Pecherskaya ulitsa 25/12, Nizhny Novgorod 603155, Russia
rinbak@mail.ru

² Central Astronomical Observatory at Pulkovo of RAS, Pulkovskoe shosse 65/1, St. Petersburg 196140, Russia

³ Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Gagarin av. 23, Nizhny Novgorod 603022, Russia

Abstract. To date, observational signs that determine the ability of a solar active region to cause an eruption of matter into the high layers of the solar corona (CME) are not entirely clear. This makes it difficult to understand the physical mechanism of the CME trigger. This paper presents a search for observational signs that may indicate the emergence of an eruptive process. For this, we have carried out a comparative analysis of the conditions before and during a flare for flare events both accompanied and not accompanied by CMEs. We studied the features of the spatial and temporal dynamics of microwave and ultraviolet emission (data from the Nobeyama Radio Heliograph, SDO/AIA), as well as magnetic fields (SDO/HMI) for 16 active regions (AR). Using this sample, it was found that flares accompanied by CMEs most often occur in open magnetic configurations, in regions with twisted magnetic ropes, and the emergence of magnetic flux. CMEs are also observed most often in flares of longer duration and in those ARs that have sources in microwave radiation that are more extended in area.

Key words: Sun, solar flares, coronal mass ejections, microwave emission, ultraviolet emission