

ПОВЕДЕНИЕ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В АКТИВНЫХ ОБЛАСТЯХ С «ЗАПЕРТЫМИ» И «ОТКРЫТЫМИ» МАГНИТНЫМИ ЖГУТАМИ

**Бакунина И.А.^{1,2}, Мельников В.Ф.², Шаин А.В.², Кузнецов С.А.²,
Абрамов-Максимов В.Е.²**

¹Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»,
Нижний Новгород, Россия

²Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

BEHAVIOR OF MICROWAVE EMISSION IN ACTIVE REGIONS WITH «LOCKED» AND «OPEN» MAGNETIC ROPES

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

¹HSE University, Nizhny Novgorod, Russia

²Pulkovo Observatory, St. Petersburg, Russia

It is shown on a sample of 15 M-class X-ray flares that CMEs occur in events with «open» magnetic ropes reconstructed in the NLFFF approximation. Magnetic ropes coincide with radio brightness maxima at 17 GHz. Several hours before the flare, in the region of magnetic ropes, a glow of loops in the EUV (94, 131 Å) is observed; in some events, these are luminous X-structures. The maximum radio brightness of the flare is then observed here. Fluctuations in radio emission in events with eruptions with periods from 10 to 100 minutes are observed for several hours before the flare.

<https://doi.org/10.31725/0552-5829-2024-25-28>

Введение

Наблюдения излучения активных областей на Солнце в микроволновом и крайнем ультрафиолетовом (КУФ) диапазонах могут помочь понять динамику и структуру вспышек, а также механизмы, приводящие к выбросам замагниченной плазмы (СМЕ – coronal mass ejections). Интересно проследить связь пространственного положения радиоисточников с магнитными жгутами (MFR – magnetic flux ropes), которые играют важную роль в накоплении и освобождении свободной магнитной энергии. При развитии плазменных неустойчивостей эта энергия может освобождаться в виде тепла, ускоренных частиц и СМЕ. Микроволновое излучение позволяет отслеживать корональные структуры с высокоэнергичными электронами, а КУФ-излучение – структуры, заполненные высокотемпературной (миллионы градусов) плазмой.

Цель нашей работы – выяснить как могут быть связаны особенности положения и ориентации магнитных жгутов в общей пространственной структуре магнитного поля АО при возникновении вспышек с СМЕ и без СМЕ с пространственной структурой и поведением источников в радио (17 ГГц) и КУФ (94 Å и 131 Å) излучениях.

Данные наблюдений, метод анализа

Мы использовали каталог вспышек NOAA, Space Weather Prediction Center (SWPC) и каталог В.Н. Ишкова [1], разделяя вспышки на confined (тип C – отсутствие эрупции, тип CE – эрупция без CME) и вспышки с CME (тип E). Всего исследовано 15 вспышек: 4 вспышки C, 3 вспышки CE и 8 вспышек E [2]. В выборку вошли только те события, время наблюдения которых попало в интервал наблюдений Радиогелиографа Нобеля (22:50 – 06:20 UT). Для каждой из 15-ти АО в выбранные моменты времени было восстановлено корональное магнитное поле из фотосферы в корону (метод «NLFFF extrapolation») согласно алгоритмам, приведенным в работах [3–5], построены карты распределения радиояркости в интенсивности и круговой поляризации на 17 ГГц по данным NoRH, а также исследованы временные профили из разных участков АО до и во время вспышки и проведено наложение контуров радиоисточников на двумерные распределения КУФ по данным SDO/AIA (94 Å и 131 Å).

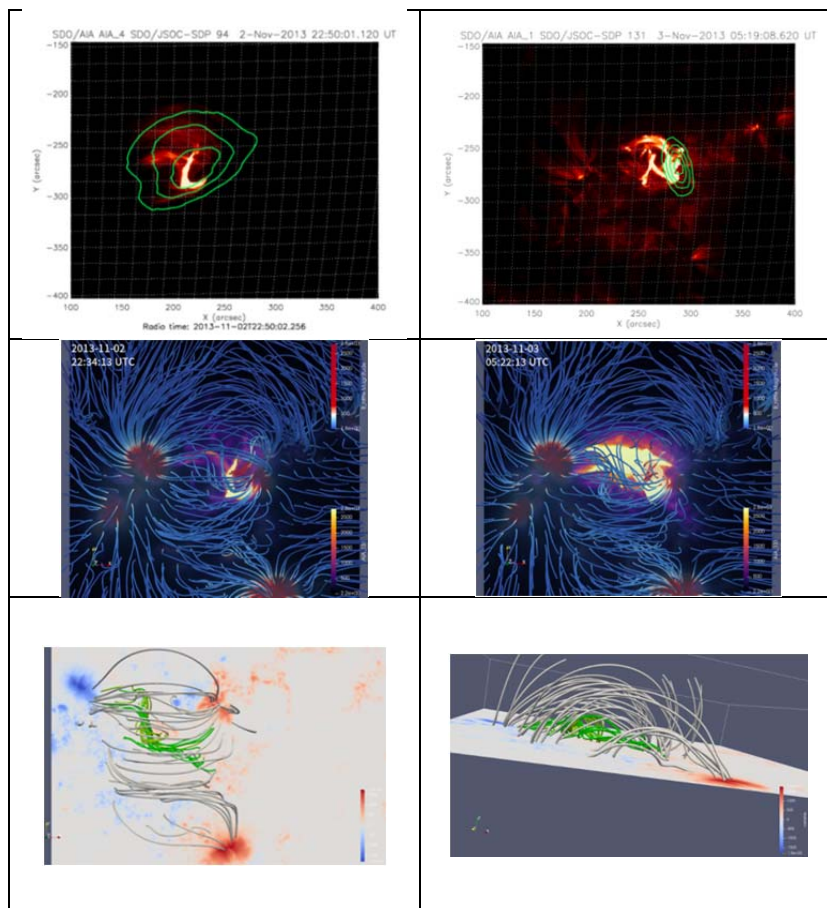
Результаты анализа

Экстраполяция магнитного поля в корону АО 11884 (событие типа C) до (04:58 UT) вспышки M 5.0 03 ноября 2013 ($T_{\text{start}} = 05:19$, $T_{\text{peak}} = 05:21$, $T_{\text{end}} = 06:30$ UT) продемонстрирована на нижней панели рис. 1. Магнитный жгут выделен зеленым цветом. На средней панели показано распределение магнитного поля на фотосфере и в короне, наложенное на распределение яркости КУФ излучения в линии 131 Å в два момента времени: до вспышки (22:34 UT) и во время вспышки (05:22 UT). На верхней панели показано распределение интенсивности радиоизлучения на 17 ГГц (контур), наложенное на распределение яркости КУФ излучения (фон) в линии 94 Å до вспышки (22:50 UT) и во время вспышки (05:19 UT). За 6 часов до начала вспышки мы видим X-структуру в КУФ излучении, которая совпадает с положением магнитного жгута и максимальной яркостью радиоисточника. Именно здесь затем и происходит вспышка класса M 5.0. 3D-распределение магнитного поля (нижняя панель) центрировано на координаты максимума яркости вспышки по данным NoRH. Здесь хорошо виден жгут под плотной аркадой петель – «запертый жгут».

Из восьми событий с CME в нашей выборке только три произошли в открытой магнитной конфигурации, в четырех случаях жгуты располагались под острым углом, «квазипараллельно», к вышележащим магнитным силовым аркам, поэтому их можно считать «открытыми».

Рассмотрим пример события с эрупцией, но без CME в АО 12673 (событие типа CE), где 4 сентября 2017 произошла вспышка класса M1.2 ($T_{\text{start}} = 05:37$, $T_{\text{peak}} = 05:39$, $T_{\text{end}} = 06:30$ UT). На рис. 2 (нижняя левая панель) хорошо видно, что все жгуты также находятся под вышележащими аркадами магнитных силовых линий, т.е. являются «запертыми», но здесь наблюдается активная динамика радиоизлучения. На нижней правой панели показаны временные профили яркостной температуры для радиоисточников 1, 2 и 3, положение которых обозначено на верхних панелях белым и черны-

ми крестиками, соответственно. Отчётливо видны цуги колебаний [6] перед вспышкой в радиоисточнике 1, соответствующем положению вспыхивающего магнитного жгута, а также в радиоисточниках 2 и 3, положения которых практически совпадают с центрами распределения поляризации положительной (радиоисточник 2) и отрицательной (радиоисточник 3) полярности. Вертикальной тонкой линией (правая нижняя панель) обозначен момент времени, соответствующий активной/взрывной фазе вспышки.



Имеет место также динамика пространственного распределения яркости. В начале наблюдений в КУФ (94 А) излучении ярче светится северная, вертикальная система петель. При этом в целом, структура источников в КУФ совпадает со структурой источников NoRH (17 ГГц) (левая верхняя и средняя панели). Радиояркость максимальна в южном основании верхней петли (пунктирная линия, левая средняя панель, поляризация разных знаков – контуры

Рис. 1. синего и красного цвета

на верхней левой панели, где фон – интенсивность на 17 ГГц). Яркость КУФ излучения максимальна в верхней части этой петли. К началу вспышки происходит перераспределение радиояркости, и, начиная с 04:10 UT, ярче светится горизонтальная система пересекающихся друг с другом КУФ петель (правая средняя панель). Это же отражается и в структуре радиоисточника (правая верхняя панель).

В тех случаях, когда происходит эрупция, но не наблюдаются СМЕ, жгуты ориентированы квази-перпендикулярно к вышележащим магнитным петлям, что может быть вероятной причиной отсутствия СМЕ. Эта закономерность хорошо согласуется с теоретическими расчётами баланса магнитных сил, представленными в работах [7, 8]. В событиях же с СМЕ жгуты во всех случаях, кроме одного, располагались квази-параллельно к вышележащим магнитным петлям, т.е. являлись «открытыми» [2].

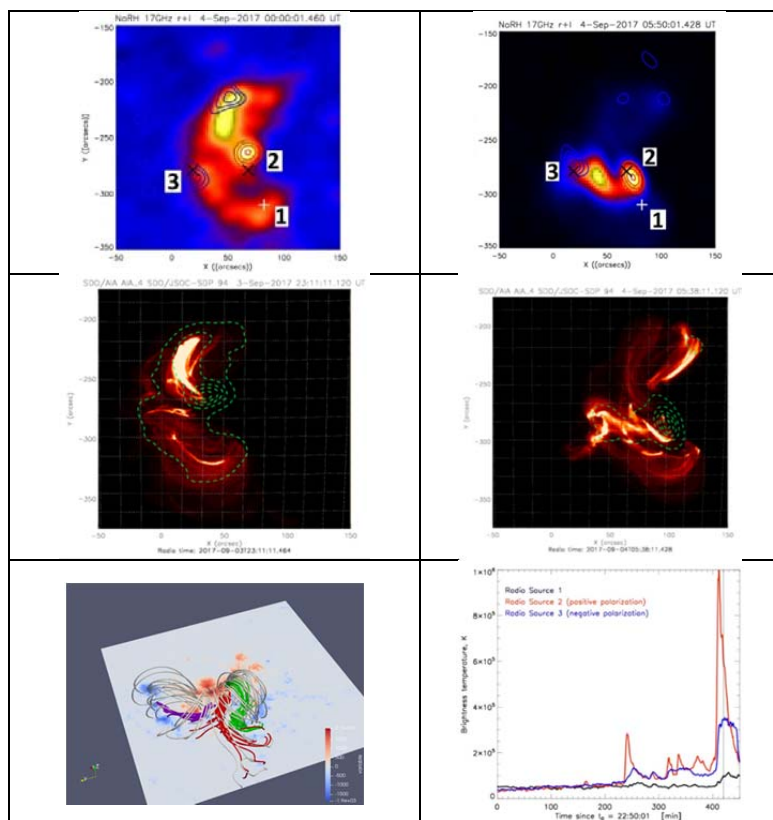


Рис. 2.

Выводы

В результате данной работы показано:

1. Большинство исследованных вспышек (12 из 15) наблюдались в закрытых магнитных конфигурациях.

2. В событиях с эрупцией, но без СМЕ (тип СЕ) жгуты ориентированы квазиперпендикулярно к вышележащим аркадам («запертые» жгуты).

3. Положения магнитных жгутов совпадают с максимумами радиояркости на 17 ГГц.

4. За несколько часов до вспышки в области расположения магнитных жгутов наблюдается свечение петель в КУФ диапазоне (94, 131 Å), в некоторых событиях петли скрещиваются, образуя светящиеся Х-структуры. Здесь же затем наблюдается и максимум радиояркости вспышки.

5. В радиоизлучении в некоторых событиях с эрупциями (типа СЕ и Е) за несколько часов до вспышки наблюдаются колебания с периодами от 10 до 100 минут.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФ 22-12-00308 (В.М., А.Ш., С.К.) и в рамках Государственного задания № 1021032422589-5 (В.А-М.).

Литература

1. Ишков В.Н., каталог, http://www.wdcb.ru/stp/data/Solar_Flare_Events/Fl_XXIV.txt
2. Bakunina I.A., Melnikov V.F., Shain A.V. et al. // Geomag. Aeronomy, 2024, vol. 64, no. 8, (в печати).
3. Wiegmann T. // Solar Physics, 2004, **219**, 87.
4. Stupishin A. Magnetic Field Library // GitHub. – URL https://github.com/Alexey-Stupishin/Magnetic-Field_Library
5. Anfinogentov S., GXBox_prep. // GitHub. – URL https://github.com/Sergey-Anfinogentov/GXBox_prep
6. Abramov-Maximov V.E., Bakunina I.A. // Geomag. Aeronomy, 2023, vol. 63, no.7, pp 916-919.
7. Соловьев А.А. // Астрофизика, 1985, том 23, выпуск 2, с. 394-408.
8. Solov'ev A.A. and E.A. Kirichuk // MNRAS, 2021, 505, 4406–4416