

**ОСОБЕННОСТИ КОРОНАЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ СТРУКТУР
В БЕССИЛОВОМ ПРИБЛИЖЕНИИ ДЛЯ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ
СО ВСПЫШКАМИ РЕНТГЕНОВСКОГО КЛАССА M,
СОПРОВОЖДАЮЩИМИСЯ И НЕ СОПРОВОЖДАЮЩИМИСЯ
КОРОНАЛЬНЫМИ ВЫБРОСАМИ МАСС**

Бакунина И.А.¹, Мельников В.Ф.², Абрамов-Максимов В.Е.²

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

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

**FEATURES OF CORONAL MAGNETIC STRUCTURES
IN THE FORCE-FREE APPROXIMATION FOR ACTIVE REGIONS
WITH X-RAY M-CLASS FLARES ACCOMPANIED AND
UNACCOMPANIED BY CME**

Bakunina I.A.¹, Melnikov V.F.², Abramov-Maximov V.E.²

¹*HSE University, Nizhny Novgorod, Russia*

²*Pulkovo Observatory, St. Petersburg, Russia*

Reconstruction of the magnetic field in a nonlinear force-free approximation based on SDO/HMI vector magnetograms for X-ray class M flares, some of which were accompanied by coronal mass ejections (CME), allowed to reveal different stages of the formation of magnetic ropes in the flare region. Based on SDO/HMI observations, as well as on the Nobeyama radioheliograph and SDO/AIA, differences in observational features in the pre-flare and post-flare phases for events with CME revealed.

DOI: 10.31725/0552-5829-2022-17-20

Магнитные жгуты органически связаны с CME (coronal mass ejection, корональными выбросами массы), но вопрос когда образуется магнитный жгут – до CME, вместе с ним или же является его последствием, до сих пор окончательно не ясен. Является ли жгут предтечей CME, развиваясь, включая все больше линий магнитной напряженности, которые все более искривляются, пока не разовьется неустойчивость, и жгут не оторвется от Солнца, выбрасывая в космос огромное количество энергии и плазмы? В другом сценарии, удаляясь от Солнца, магнитное поле плазмы пытается соединиться как разные полюса магнитов, в результате чего внутри CME образуются магнитные жгуты.

«Стандартная модель вспышки», или CSHKP model [1–4], предполагает присутствие магнитных жгутов (MFR – magnetic flux ropes) в короне АО (активной области) как предпосылку для инициирования эруптивных вспышек. MFR распознается как набор силовых линий магнитного поля, которые закручены вокруг своей центральной оси более одного раза [5]. Считается, что эти сложные структуры образуются в результате пересо-

единения потока по линии инверсии полярности (PIL – polarity inversion line) через фотосферный сдвиг и сходящиеся движения [6].

Цель нашей работы – выяснить роль магнитных жгутов в возникновении вспышек и СМЕ на основе исследования предвспышечной динамики многоволновых излучений и восстановления коронального магнитного поля из фотосферы в корону (метод «NLFFF extrapolation») для эруптивных (с СМЕ) и «confined» (либо без эрупции, либо с несостоявшимися СМЕ – запертой эрупцией) активных областей.

Мы использовали каталог вспышек NOAA, Space Weather Prediction Center (SWPC) и каталог В.Н. Ишкова [7], разделяя вспышки на confined (С – отсутствие эрупции, эрупция без СМЕ – CE) и вспышки с СМЕ (Е). Всего исследовано 15 вспышек: 4 вспышки С, 3 вспышки CE и 8 вспышек Е.

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 перед вспышками, а для нескольких АО – во время вспышек и после них – было восстановлено корональное магнитное поле из фотосферы в корону (метод «NLFFF extrapolation») согласно алгоритмами, приведенными в работах [8–10].

Как для событий без СМЕ, 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, в основном, локализуется вблизи таких открытых магнитных конфигураций (и корональных дыр). В отличие от них, в событиях без СМЕ вспышка происходит, в основном, 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.

Ранее для двух АО, входящих в нашу выборку, мы показали [11], что магнитный жгут формируется за 2–3 часа до начала вспышек, которые затем начинаются в области его формирования, проявляют себя в виде возгорания скрещенных петель в КУФ (крайнем ультрафиолетовом диапазоне).

На эту же область приходится максимум яркости радиоизлучения на 17 ГГц. Но главным отличием между рассмотренными двумя активными областями было отличие в структуре магнитного поля над ними – открытая и закрытая магнитные конфигурации, что в первом случае способствовало выходу СМЕ, а во втором его отсутствию. То есть, зарождение и формирование MFR за несколько часов до вспышки, возможно, и является необходимым условием СМЕ, но не достаточным. MFR образуются и в АО без СМЕ, где замкнутые магнитные поля не создают условий для освобождения плазмы из короны.

В данной работе мы хотим обратить внимание на изменение структуры магнитного поля в NLFFF-приближении с визуализацией в GX_simulator до и после вспышек с CME.

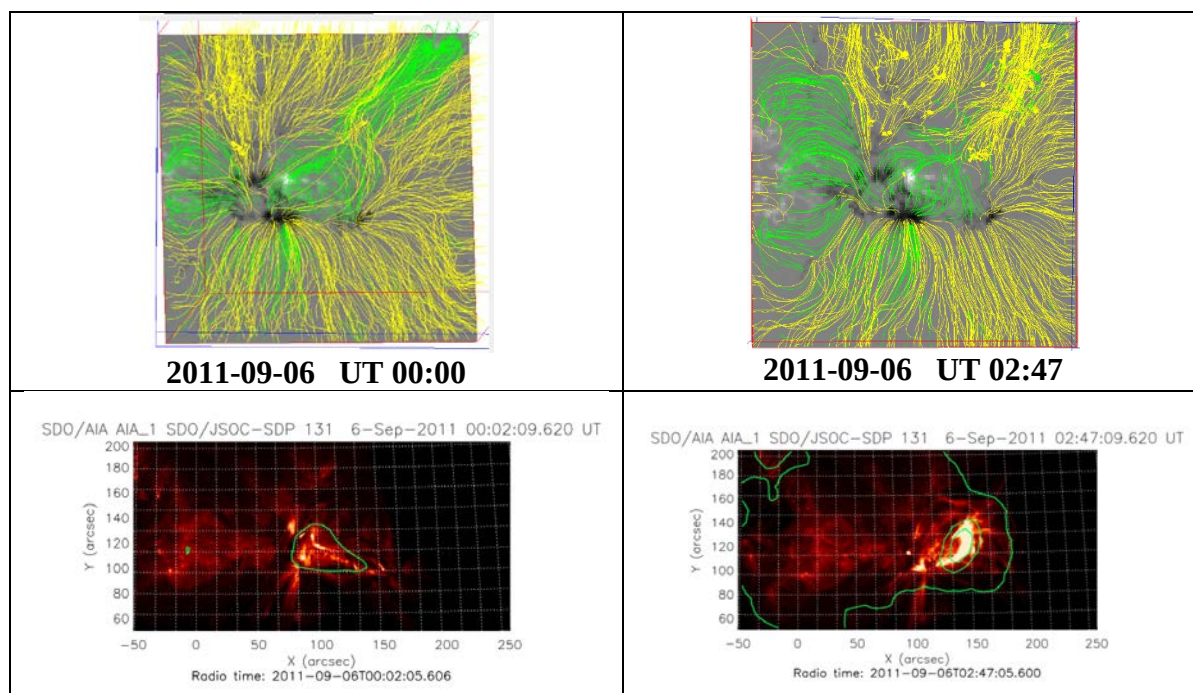


Рис. 1.

Рассмотрим вспышку в АО 11283 M5.3/1B (0135 0150 0236), 2011-09-06, которая сопровождалась CME в 02:24 UT, согласно [7].

Рис. 1 (верхняя панель) демонстрирует наличие магнитных жгутов за полтора часа до вспышки в момент 00:00 UT (слева) и существенное изменение скрученных полей после вспышки и выхода CME, в момент 02:47 UT (справа). Изображения центрированы на координаты максимума радиояркости вспышки по данным NoRH. Нижняя панель демонстрирует, как менялось распределение яркости в КУФ, $131\text{\AA}$, для этих же моментов времени, соответственно (зеленые контуры – радиояркость в интенсивности, 17 ГГц). Изображения справа демонстрируют наличие нового магнитного жгута, которого не было до вспышки, в том же месте, где наблюдается яркое свечение в КУФ. Возможно, именно здесь и произошел CME.

Еще одна вспышка класса M в АО 11877 M 9.3/1N (0021 0030 0048), 2013-10-24, которая сопровождалась CME в 01:25 UT, согласно [7], демонстрирует в NLFFF-экстраполяции значительную перестройку MFR, вплоть до их исчезновения после CME.

На рис. 2 (верхняя панель) видно наличие скрученных магнитных силовых линий за 20 минут до начала вспышки в момент 00:00 UT (слева) и их исчезновение после вспышки в момент выхода CME, в 01:25 UT (справа). Нижняя панель демонстрирует существенное изменение как распределения яркости в КУФ, $131\text{\AA}$, для 00:00 UT (слева) и 00:55 UT (справа), со-

ответственно, так и в структуре радиоисточников (зеленые контуры – радиояркость в интенсивности, 17 ГГц).

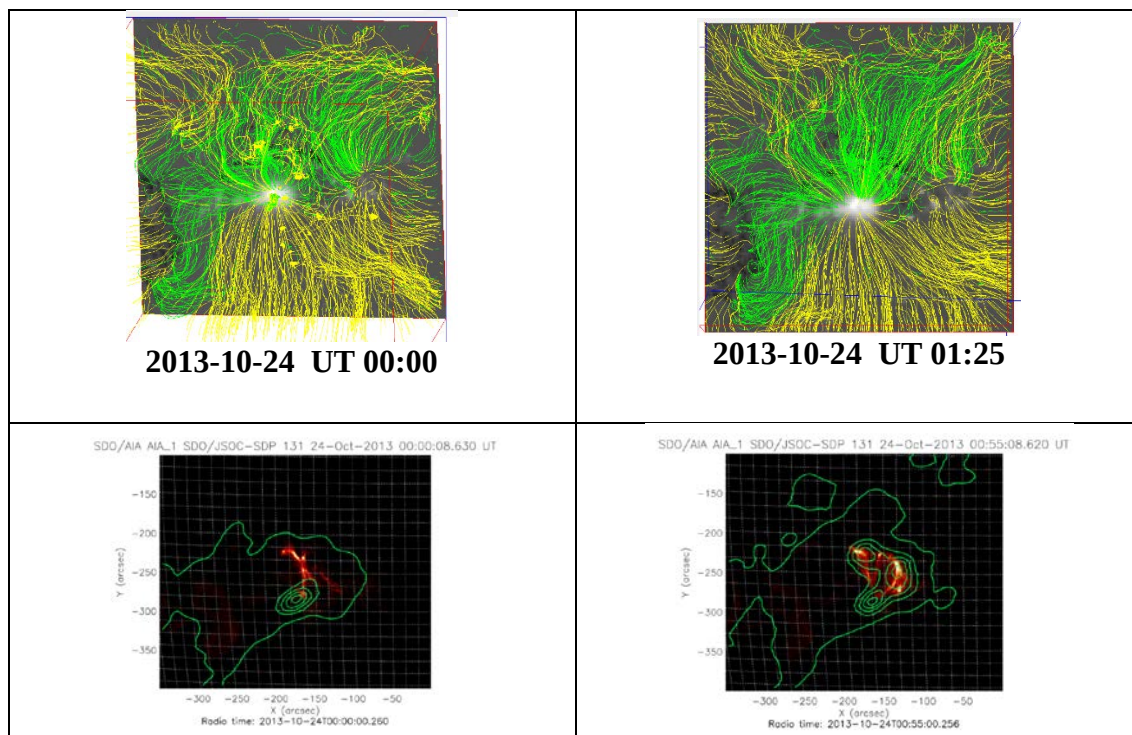


Рис. 2.

Таким образом, эти два примера из нашей выборки событий с СМЕ говорят, о том, что скрученные магнитные силовые линии формируются перед вспышками и испытывают значительную трансформацию, вплоть до исчезновения, в момент и после СМЕ.

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

Литература

1. Carmichael, H. // NASA Spec. Publ., 1964, **50**, 451
2. Sturrock, P.A. // Nature, 1966, **211**, 695
3. Hirayama, T. // Solar Phys., 1974, **34**(2), 323
4. Kopp, R.A., Pneuman, G.W. // Solar Phys., 1976, **50**, 85.
5. Gibson, S.E., Fan, Y., Török, T., & Kliem, B. // SSRv, 2006, 124, 131
6. van Ballegooijen, A.A., & Martens, P.C.H. // ApJ, 1989, 343, 971
7. В.Н. Ишков, каталог, http://www.wdcb.ru/stp/data/Solar_Flare_Events/Fl_XXIV.txt
8. Wiegmann T. // Solar Phys., 2004, **219**, 87
9. Stupishin A., Magnetic Field Library // GitHub. –, URL https://github.com/Alexey-Stupishin/Magnetic-Field_Library
10. Anfinogentov S., GXBox_prep. // GitHub. – URL https://github.com/Sergey-Anfinogentov/GXBox_prep
11. Bakunina, I.A., Mel'nikov, V.F., Shain, A.V., et al. // Izv. Krym. Astrofiz. Obs., 2022, vol. 117, no. 1, pp. 65–74.