

МАГНИТНЫЕ ЖГУТЫ ВО ВСПЫШЕЧНЫХ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЯХ

**Бакунина И.А.¹, Мельников В.Ф.², Шайн А.В.², Кузнецов С.А.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*

MAGNETIC FLUX ROPES IN FLARE ACTIVE REGIONS

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

¹*HSE University, Nizhny Novgorod, Russia*

²*Pulkovo Observatory, St. Petersburg, Russia*

<https://doi.org/10.31725/0552-5829-2023-23-26>

It is shown that the positions of the flux ropes in the general spatial structure of the active region magnetic field reconstructed in the NLFFF approximation for flares with and without CME are different: magnetic flux ropes are located quasi-parallel to the overlying magnetic field lines in the events with CME, and quasi-perpendicular in the “confined” events.

Введение

Магнитные жгуты (MFR – magnetic flux ropes) во вспышечных активных областях играют важную роль в накоплении и освобождении свободной магнитной энергии. Известно, что эта энергия может освобождаться в виде тепла, ускоренных частиц и эрупции замагниченной плазмы (СМЕ). Так называемая «Стандартная модель вспышки», предполагает присутствие магнитных жгутов в короне АО (активной области), которые расположены под магнитными аркадами вдоль нейтральной линии магнитного поля, как предпосылку для инициирования эруптивных вспышек. Конкретный вид энерговыделения, по-видимому, зависит от специфических физических условий в активных областях. В частности, из теоретических соображений ожидается, что выброс корональной плазмы может коррелировать со степенью скрученности магнитных силовых линий в жгуте: чем она больше, тем выше вероятность нарушения равновесия и подъёма жгута в высокие слои короны [1–3]. Важную роль для реализации или нарушения этого равновесия может играть конкретный вид конфигурации магнитного поля над жгутом [1].

Цель нашей работы – выяснить роль особенностей ориентации жгутов в общей пространственной структуре магнитного поля АО при возникновении вспышек и СМЕ на основе восстановления коронального магнитного поля из фотосферы в корону (метод «NLFFF extrapolation») для эруп-

тивных (с CME) и «confined» (либо без эрупции, либо с несостоявшимися CME – запертой эрупцией) вспышечных событий.

Данные наблюдений, метод анализа

Мы использовали каталог вспышек NOAA, Space Weather Prediction Center (SWPC) и каталог В.Н. Ишкова [4], разделяя вспышки на confined (тип C – отсутствие эрупции, тип CE – эрупция без CME) и вспышки с CME (тип E). Всего исследовано 15 вспышек рентгеновского класса M: 5 вспышек C, 3 вспышки CE и 7 вспышек E [5]. 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 и после них, было восстановлено корональное магнитное поле из фотосферы в корону (метод «NLFFF extrapolation») согласно алгоритмам, приведенным в работах [6–8].

Результаты анализа

Продемонстрируем пространственную структуру магнитного поля с наложением на магнитограммы и ультрафиолетовое излучение 171 Å для четырех активных областей из 15-ти проанализированных.

На рис. 1 (верхняя панель) (событие типа C) представлена экстраполяция магнитного поля в корону в АО 12192 для двух моментов времени: до (23:58 UT) и после (03:22 UT) вспышки M 8.7 22 октября 2014 ($T_{\text{start}} = 01:17$, $T_{\text{peak}} = 01:39$, $T_{\text{end}} = 03:25$ UT). Величина магнитного поля на фотосфере показана цветом (шкала справа). Магнитограмма центрирована на координаты максимума яркости вспышки по данным NoRH. Здесь хорошо виден жгут под плотной аркадой петель (левая верхняя панель, красный цвет) в месте вспышки. После вспышки (правая верхняя панель) видны некоторые изменения в скрученности жгута, но сам жгут не распадается.

На рис. 1 (нижняя панель) показана пространственная конфигурация восстановленного магнитного поля в АО 11967 (событие типа CE) до и во время вспышки класса M 5.2 4 февраля 2014 ($T_{\text{start}} = 03:49$, $T_{\text{peak}} = 03:50$, $T_{\text{end}} = 04:28$ UT) с эрупцией при магнитной конфигурации бета-гамма-дельта. За час до начала вспышки мы наблюдаем сильно-скрученное магнитное поле под аркадой замкнутых петель (левая нижняя панель): два жгута, выделенных красным и зеленым цветом. После вспышки эти жгуты выглядят менее скрученными (правая нижняя панель). Жгуты накрывает мощная аркада замкнутых вышележащих петель, ориентированных квазиперпендикулярно, что, вероятно, и стало причиной отсутствия CME, связанного с этой вспышкой. Эта закономерность хорошо согласуется с теоретическими расчётами баланса магнитных сил, представленными в работах [1, 9].

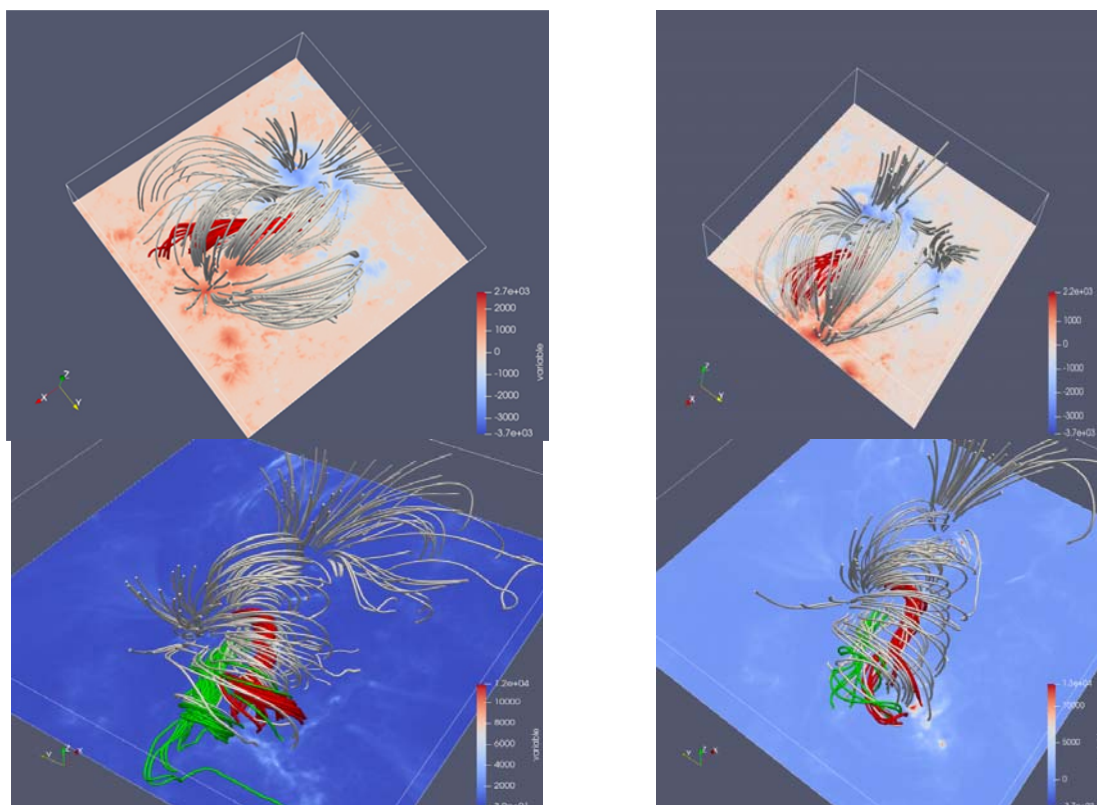


Рис. 1.

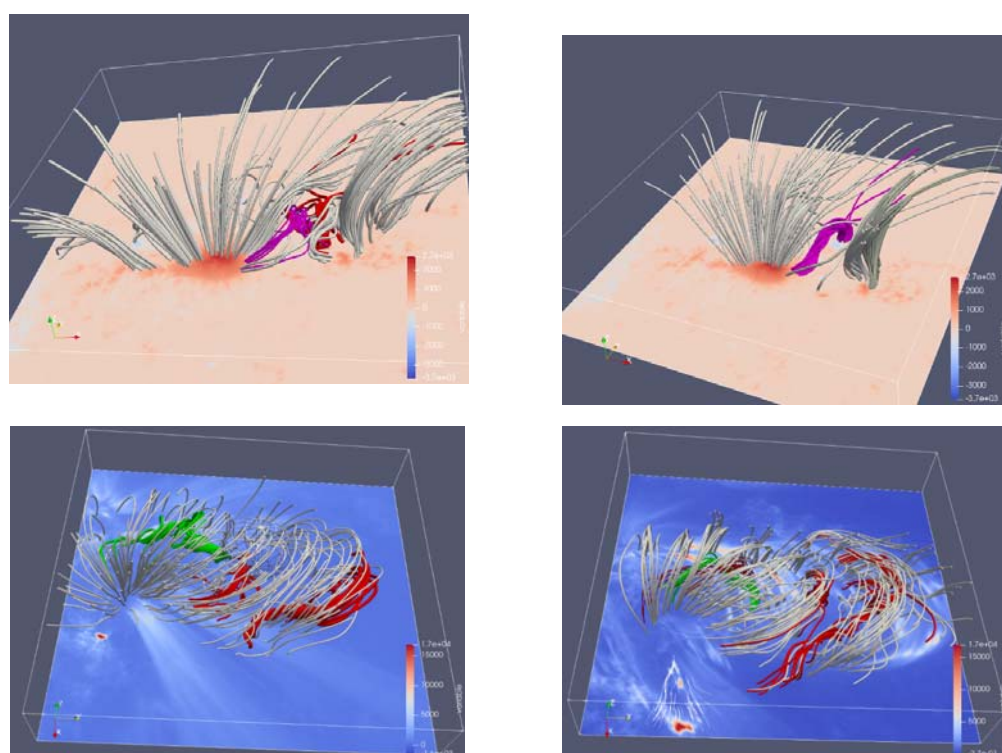


Рис. 2.

Типичный пример конфигурации магнитного поля в короне для события с СМЕ в АО 11877 непосредственно до вспышки (23:58 UT) и сразу

после (00:46 UT) вспышки М 9.3 24 октября 2013 ($T_{\text{start}} = 00:26$, $T_{\text{peak}} = 00:27$, $T_{\text{end}} = 00:43$ UT) показан на рис. 2 (верхняя панель). Видно, что низкие магнитные жгуты (выделенные красным и розовым цветом) располагаются в окрестностях уходящих высоко в корону магнитных силовых линий. После вспышки виден только один жгут, изменивший свое пространственное положение.

В качестве другого примера события с СМЕ рассмотрим АО 11402 (рис. 2, нижняя панель). В этом событии вспышка класса М 8.7 23 января 2012 ($T_{\text{start}} = 01:36$, $T_{\text{peak}} = 03:50$, $T_{\text{end}} = 06:06$ UT) произошла в замкнутой магнитной конфигурации. Однако, магнитные жгуты (выделены красным цветом) в области вспышки расположены квазипараллельно вышележащим магнитным силовым трубкам. Согласно работе [1], в которой исследовался баланс сил, действующих на жгут в зависимости от его ориентации относительно внешнего магнитного поля, в таком случае облегчаются условия подъема и выхода жгута в высокие слои короны. Через два часа после пика вспышки жгуты выглядят менее закрученными ($t = 05:58$ UT, правая панель), чем до вспышки ($t = 01:22$ UT, левая панель).

В результате данной работы показано следующее. Магнитные жгуты наблюдаются во всех исследованных АО, как до, так и после вспышек. После вспышек жгуты выглядят менее скрученными. В обоих подтипах событий «confined» (C, CE) магнитные жгуты наблюдаются преимущественно в закрытых конфигурациях, квазиперпендикулярно вышележащим магнитным силовым линиям. В отличие от этого, магнитные жгуты в событиях с СМЕ наблюдались либо в открытых магнитных конфигурациях, либо были ориентированы квазипараллельно вышележащим магнитным силовым линиям.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РНФ 22-12-00308 и в рамках Государственного задания № 1021032422589-5.

Литература

1. Соловьев А.А. // Астрофизика, 1985, том 23, выпуск 2, с. 394-408
2. Aulanier G., Torok T., D'emoulin P., and DeLuca E.E. // ApJ, 2010, 708:314–333
3. Zaitsev, V.V. & Stepanov, A.V. // *Geomag. Aeronomy*, 2020, 60, 915
4. Илюков В.Н., каталог, http://www.wdcb.ru/stp/data/Solar_Flare_Events/Fl_XXIV.txt
5. Bakunina I.A., Melnikov V.F., Shain A.V. et al. // *Geomag. Aeronomy*, 2023, vol. 63, no. 7
6. Wiegmann T. // *Solar Physics*, 2004, **219**, 87
7. Stupishin A. Magnetic Field Library // GitHub. – URL https://github.com/Alexey-Stupishin/Magnetic-Field_Library
8. Anfinogentov S., GXBox_prep. // GitHub. – URL https://github.com/Sergey-Anfinogentov/GXBox_prep
9. Solov'ev A.A. and E.A. Kirichek // MNRAS, 2021, 505, 4406–4416