

# МАГНИТНЫЕ ЖГУТЫ В АКТИВНЫХ ОБЛАСТЯХ С ЭРУПТИВНЫМИ И НЕЭРУПТИВНЫМИ ВСПЫШКАМИ

*Бакунина И.А.<sup>1</sup>,  
Мельников В.Ф.<sup>2</sup>,  
Кузнецов С.А.<sup>2</sup>, Абрамов-  
Максимов В.Е.<sup>2</sup>,  
<sup>1</sup> НИУ ВШЭ, Нижний  
Новгород  
<sup>2</sup> ГАО РАН, Санкт-  
Петербург*

«МАГНЕТИЗМ И АКТИВНОСТЬ СОЛНЦА 2023» (КРЫМ - 2023)  
13-16 июня 2023 г., КРАО РАН

Наличие скрученных магнитных жгутов (MFR – magnetic flux ropes) под аркадами свидетельствует о накоплении свободной магнитной энергии в активной области.

**Цель нашей работы** - выяснить роль магнитных жгутов в возникновении вспышек и СМЕ на основе исследования восстановленного 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.

## Наблюдения

Мы использовали каталог вспышек NOAA, Space Weather Prediction Center (SWPC) и каталог В.Н. Ишкова [1], разделяя вспышки на три типа: confined (тип С – отсутствие эрупции, тип СЕ – эрупция без СМЕ) и вспышки с СМЕ (тип Е). Всего исследовано 15 вспышек рентгеновского класса М: 5 вспышек С, 3 вспышки СЕ и 7 вспышек Е.

В выборку вошли только те события, время наблюдения которых попало в интервал наблюдений Радиогелиографа Нобеяма (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 алгоритмам, приведенными в работах [2-4].

1. В.Н. Ишков, каталог, [http://www.wdcb.ru/stp/data/Solar\\_Flare\\_Events/Fl\\_XXIV.txt](http://www.wdcb.ru/stp/data/Solar_Flare_Events/Fl_XXIV.txt)
2. Wiegmann T. // *Solar Phys.*, 2004, **219**, 87
3. Stupishin A., *Magnetic Field Library* // GitHub. – , URL [https://github.com/Alexey-Stupishin/Magnetic-Field\\_Library](https://github.com/Alexey-Stupishin/Magnetic-Field_Library)
4. Anfinogentov S., *GXBox\_prep.* // GitHub. – URL [https://github.com/Sergey-Anfinogentov/GXBox\\_prep](https://github.com/Sergey-Anfinogentov/GXBox_prep)

**В данной работе мы хотим обратить внимание на положение жгутов в общей пространственной структуре магнитного поля АО, восстановленного в NLFFF-приближении в разные моменты времени до и после вспышки.**

## Результаты

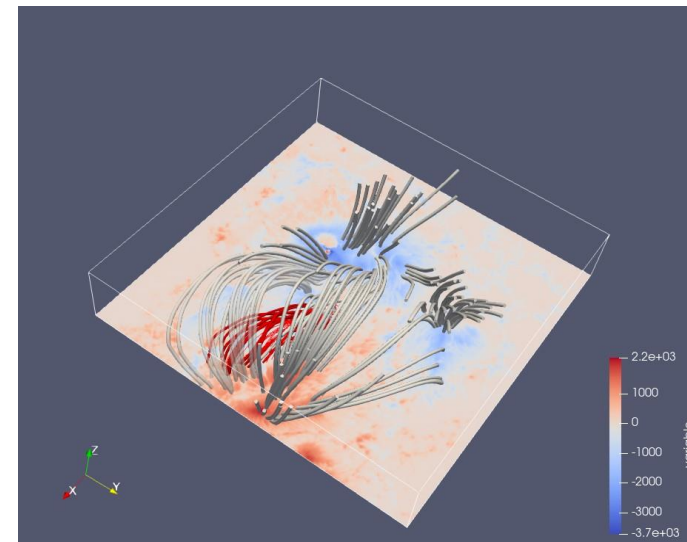
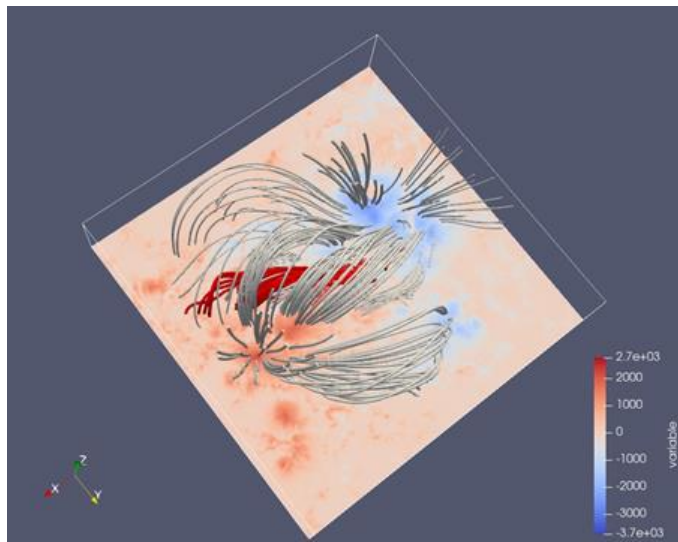
Известно, что АО или конкретная вспышка в ней может быть эруптивной, но при этом эрупция не выходит за пределы Солнца, не возникает СМЕ (failed eruption), и тогда эти события в литературе обычно называют «confined».

Здесь возникает путаница с применением термина «неэруптивная» вспышка. Мы разделяли вспышки на confined (С) (отсутствие эрупции) и вспышки с СМЕ (Е). Но есть вспышки, где была отмечена в каталогах эрупция, но не возникло СМЕ. Эти вспышки будем отмечать значком СЕ.

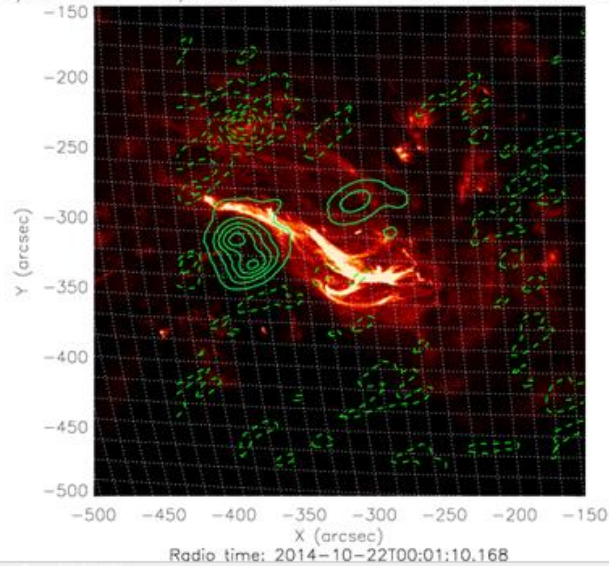
Продемонстрируем пространственную структуру магнитного поля с наложением на магнитограммы и ультрафиолетовое излучение  $171 \text{ \AA}$  для пяти активных областей из 15-ти проанализированных.

На Рис. 1 (верхняя панель) 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). Это событие относится к типу C, согласно нашей классификации. Величина магнитного поля на фотосфере показана цветом (нижняя шкала).

На нижней панели показано наложение интенсивности радиоизлучения на 17 ГГц в круговой поляризации (контуры) на EUV изображения в линии 131Å (фон) в два момента времени: 00:01 UT – перед вспышкой и 03:47 UT после вспышки. Магнитограмма центрирована на координаты максимума яркости вспышки по данным NoRH (Position: S12E21, X (arcsec) : -354, Y (arcsec) : -295). 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. В том месте, где виден жгут (и это – место пика яркости вспышки), ярко светятся петли в крайнем ультрафиолетовом диапазоне 131 Å.



SDO/AIA AIA\_1 SDO/JSOC-SDP 131 22-Oct-2014 00:01:08.620 UT



SDO/AIA AIA\_1 SDO/JSOC-SDP 131 22-Oct-2014 03:47:08.620 UT

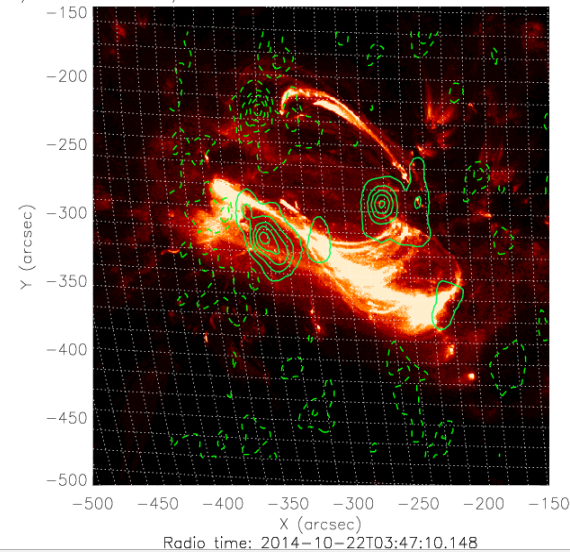
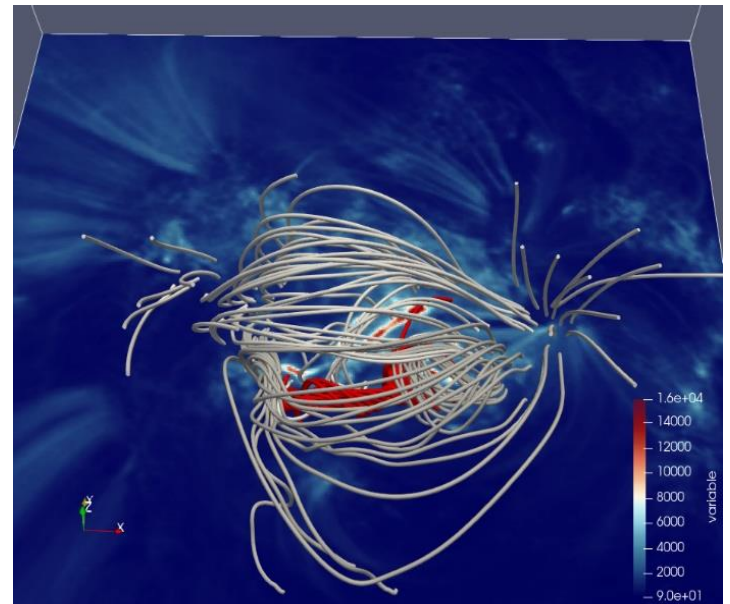
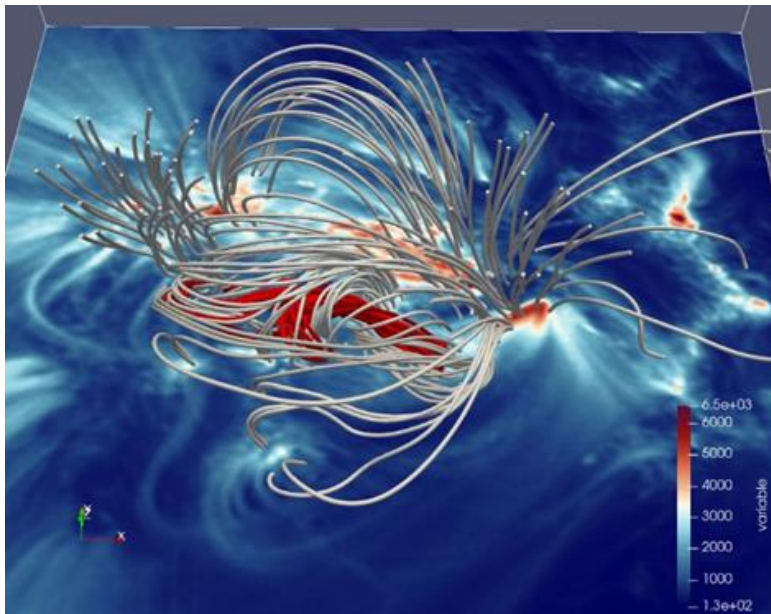


Рис. 1

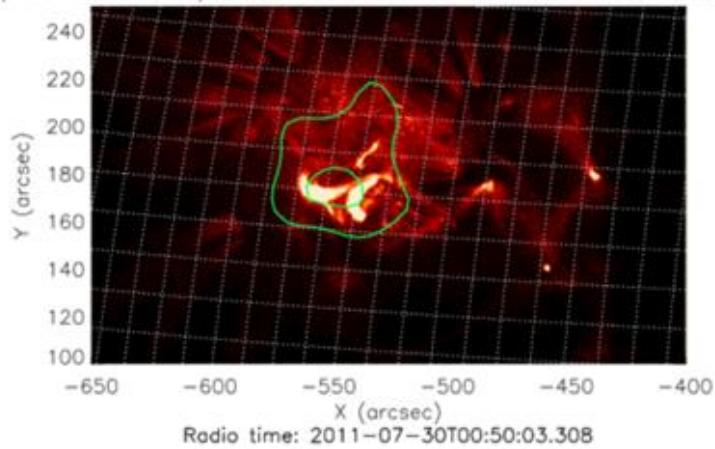
АО 12192 для двух моментов времени: до (23:58 UT) и после (03:22 UT) вспышки M 8.7 22 октября 2014 ( $T_{\text{start}} = 01:17$ ,  $T_{\text{peak}} = 01:39$ ,  $T_{\text{end}} = 03:25$  UT) (событие типа C).

На Рис. 2 показана пространственная конфигурация восстановленного («NLFFF extrapolation») магнитного поля в АО 11261 (событие типа C), а также распределения яркости ультрафиолетового излучения ( $131\text{\AA}$ ) и радиоизлучения (17 ГГц) в интенсивности до и во время вспышки класса M 9.3 30 июля 2011 ( $T_{\text{start}} = 02:07$ ,  $T_{\text{peak}} = 02:07$ ,  $T_{\text{end}} = 02:17$  UT) при магнитной конфигурации бета-гамма-дельта. Фон на рисунках верхней панели – UV 171  $\text{\AA}$ , центрирование - на координаты максимума яркости вспышки по данным NoRH. Экстраполяция магнитного поля в корону АО 11261 за два часа до начала вспышки (в 00:10 UT) показывает наличие замкнутой конфигурации магнитного поля в центре изображения (где находится центр вспышки), под которой виден магнитный жгут (выделен красным цветом), закрытый сверху магнитными аркадами (левая верхняя панель). На правой верхней панели – конфигурация магнитного поля после вспышки (в 02:22 UT).

Магнитное поле меняется довольно заметно - слева появилась похожая на жгут структура, которой не было до вспышки. На левой нижней панели мы видим более чем за час до вспышки скрещенные петли в крайнем ультрафиолете ( $131\text{\AA}$ ), так называемые «X-структуры» [5], на которые приходится максимум яркости на 17 ГГц в интенсивности. Правая нижняя панель показывает, что максимум яркости вспышки приходится именно на это место.



SDO/AIA AIA\_1 SDO/JSOC-SDP 131 30-Jul-2011 00:52:09.620 UT



SDO/AIA AIA\_1 SDO/JSOC-SDP 131 30-Jul-2011 01:59:09.620 UT

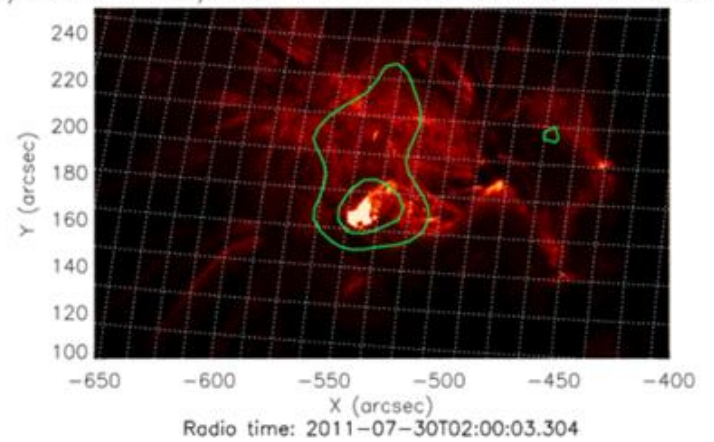


Рис. 2

АО 11261 (событие типа C), M 9.3 30 июля 2011 ( $T_{\text{start}} = 02:07$ ,  $T_{\text{peak}} = 02:07$ ,  $T_{\text{end}} = 02:17$  UT)



На Рис. 3 показана пространственная конфигурация восстановленного магнитного поля в АО 11967 (событие типа СЕ), а также проекции распределения яркости ультрафиолетового излучения ( $131\text{\AA}$ ) и радиоизлучения (17 ГГц) в круговой поляризации до и во время вспышки класса М 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 верхняя панель) - два жгута (выделены красным и зеленым цветом).

После вспышки эти жгуты выглядят менее скрученными (правая верхняя панель). Слева, в месте мощного жгута, за час до вспышки наблюдается свечение аркад в ультрафиолетовом диапазоне (нижняя левая панель). Сама же вспышка происходит под компактными петлями, основания которых поляризованы в радиодиапазоне (17 ГГц) и которые после вспышки сохраняют свою форму (нижняя правая панель). Жгуты накрывает мощная аркада замкнутых вышележащих петель, что, вероятно, и стало причиной отсутствия СМЕ, связанного с этой вспышкой. Этот вывод хорошо согласуется с моделями, представленными в работах [6-8].

6. Соловьев А.А. // *Астрофизика*, 1985, том 23, выпуск 2, стр. 394-408

7. A. A. Solov'ev and E. A. Kirichuk Force-free magnetic flux ropes: inner structure and basic properties // *MNRAS* **505**, 4406–4416 (2021) // Advance Access publication 2021 June 2

8. A.A. Solov'ev Force-free magnetic flux ropes: String confinement of super-strong magnetic fields and flare energy release // *MNRAS* **515**, 4981–4989 (2022)

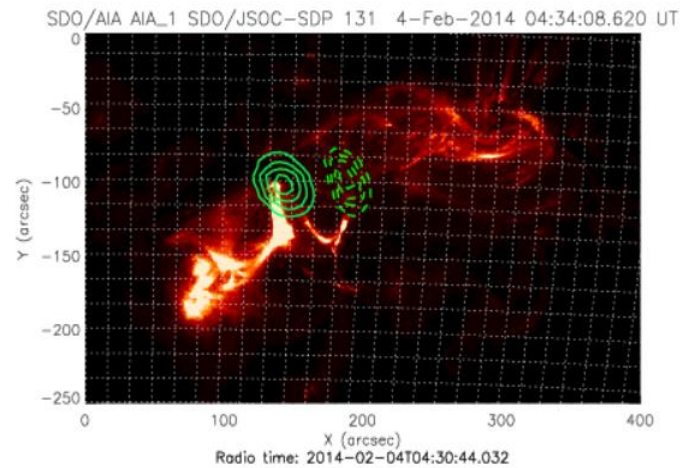
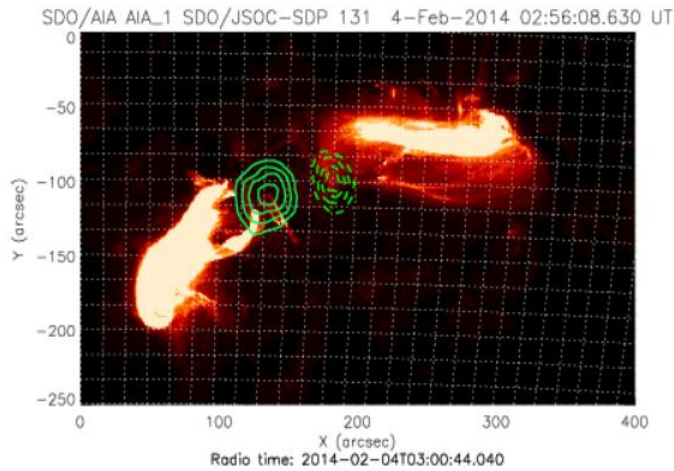
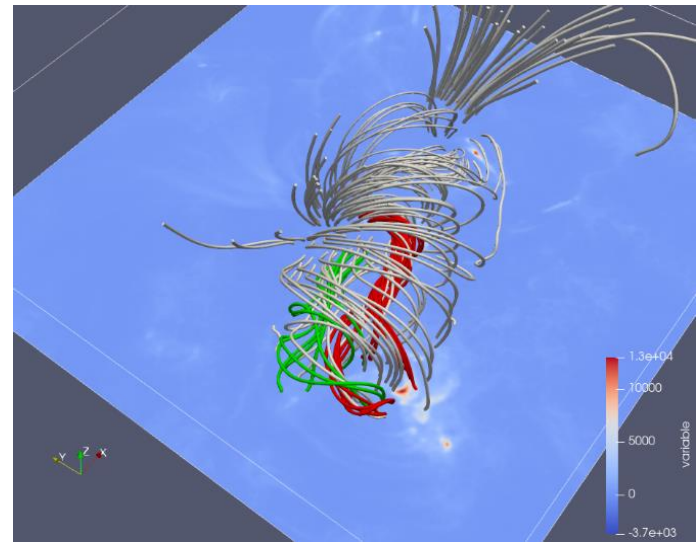
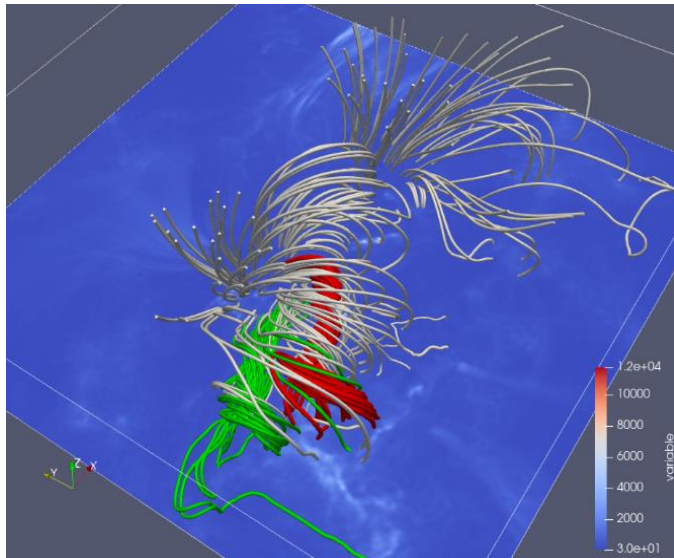
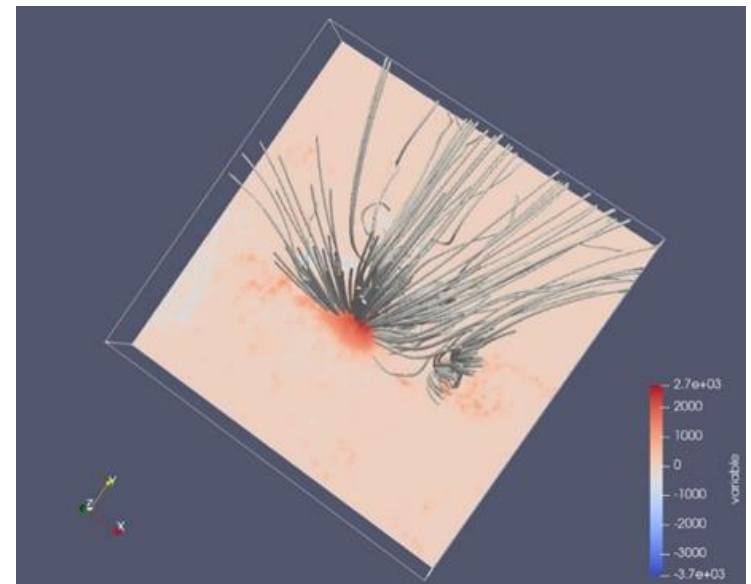
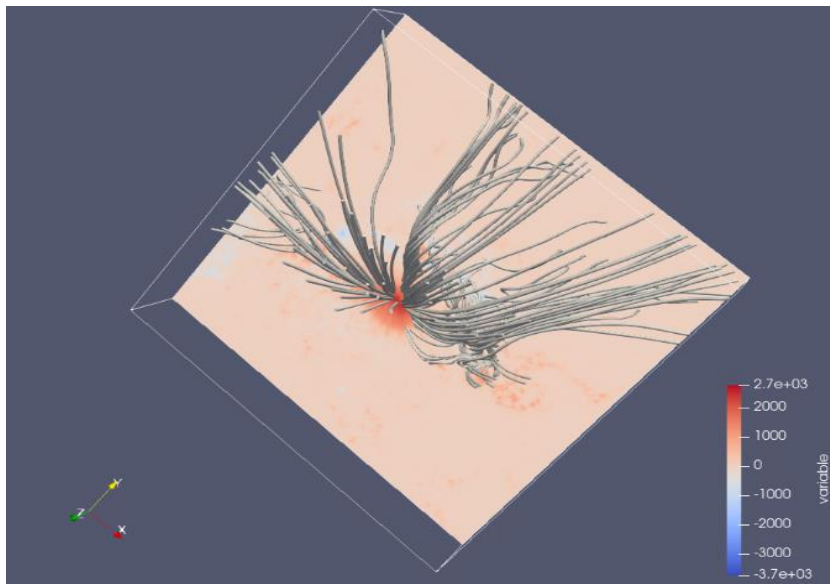


Рис. 3

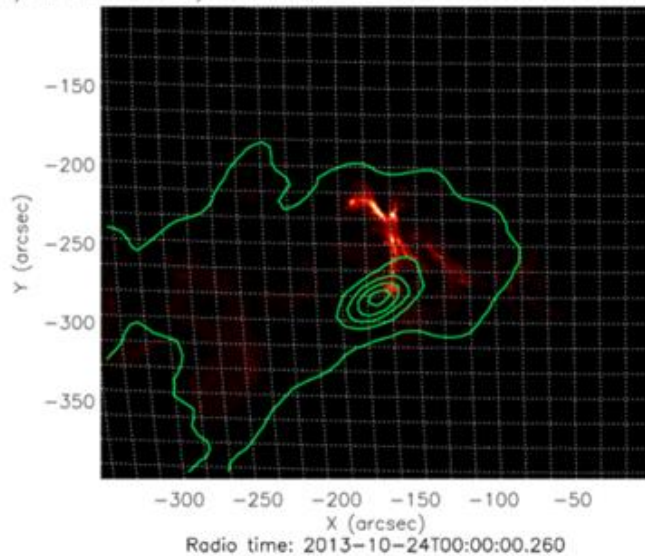
АО 11967 (событие типа СЕ), М 5.2 4 февраля 2014 ( $T_{\text{start}} = 03:49$ ,  $T_{\text{peak}} = 03:50$ ,  $T_{\text{end}} = 04:28$  UT)

Типичный пример события с СМЕ (тип E) продемонстрирован на Рис. 4. Верхняя панель – экстраполяция магнитного поля в корону АО 11877 непосредственно до вспышки (23:58 UT) и сразу после (00:46 UT) вспышки M 9.3 24 октября 2013 ( $T_{\text{start}} = 00:26$ ,  $T_{\text{peak}} = 00:27$ ,  $T_{\text{end}} = 00:43$  UT) - показывает полностью открытую магнитную конфигурацию и магнитный жгут, как бы спрятанный за ней. Состояние жгута меняется после вспышки визуально к меньшей скрученности.

Наложение радиоизлучения на 17 ГГц в интенсивности на EUV изображения в линии 131 Å (нижняя панель) показывает, что вспышка инициируется в области X-структур, которые наблюдаются до нее (левая нижняя панель), а пик яркости в радиодиапазоне приходится именно на место таких структур, что также совпадает с местом расположения магнитного жгута.



SDO/AIA AIA\_1 SDO/JSOC-SDP 131 24-Oct-2013 00:00:08.630 UT



SDO/AIA AIA\_1 SDO/JSOC-SDP 131 24-Oct-2013 00:50:08.620 UT

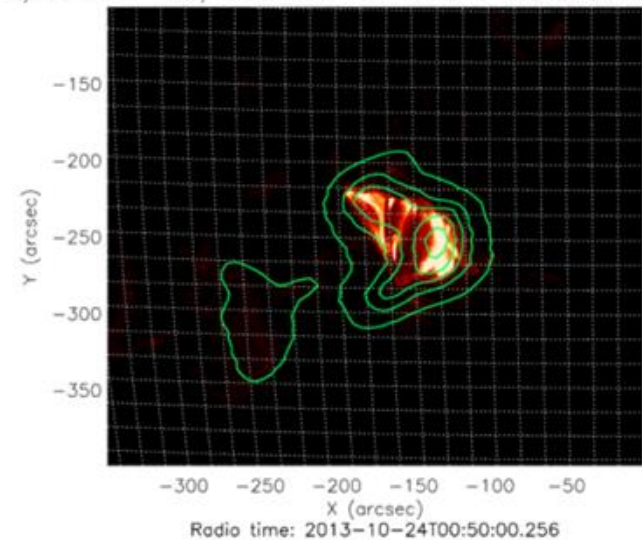
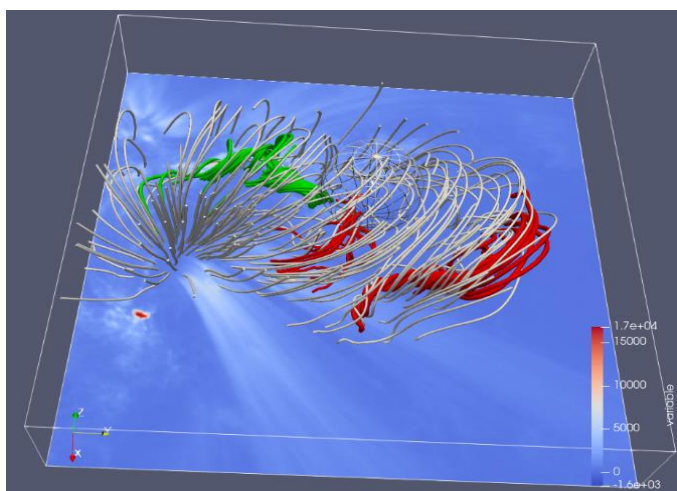


Рис. 4

АО 11877 (событие типа E), M 9.3 24 октября 2013 ( $T_{\text{start}} = 00:26$ ,  $T_{\text{peak}} = 00:27$ ,  $T_{\text{end}} = 00:43$  UT)

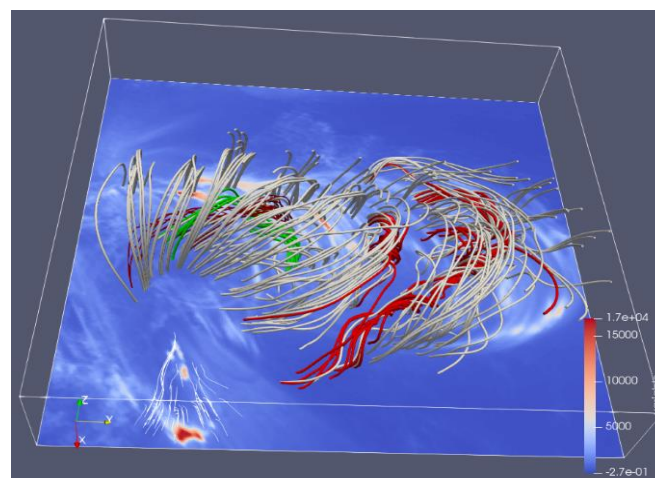
В качестве другого примера события с СМЕ (событие типа E) (Рис. 5) рассмотрим нетипичную АО 11402 из нашей выборки, где вспышка M 8.7 23 января 2012 ( $T_{\text{start}} = 01:36$ ,  $T_{\text{peak}} = 03:50$ ,  $T_{\text{end}} = 06:06$  UT) происходит в замкнутой магнитной конфигурации, но жгуты (выделены красным цветом) в месте возникновения вспышки расположены квази-параллельно вышележащим магнитным силовым трубкам.

Согласно работам [6-8], в таком случае облегчаются условия подъёма и выхода жгута в высокие слои короны. На правой панели мы наблюдаем через два часа после пика вспышки (в 05:58 UT) менее закрученные жгуты, чем до вспышки (в 01:22 UT) (левая панель).



AR11402\_magfield\_0122\_UV171  
\_0122\_23012012

Рис. 5



AR11402\_magfield\_0558\_UV171\_  
0558\_23012012

## **Выводы:**

Таким образом, исследовав 15 АО, в которых представлены все типы событий (С, СЕ и Е), мы можем сделать следующие выводы:

- 1) Магнитные жгуты наблюдались во всех исследованных АО, как до, так и после вспышек.
- 2) После вспышек жгуты выглядят менее скрученными.
- 3) Вспышки с СМЕ во всех исследованных областях, кроме одной, наблюдались в открытых магнитных конфигурациях, а вспышки обоих подтипов «confined» (С, СЕ) - в закрытых конфигурациях.
- 4) Магнитные жгуты в событиях с СМЕ располагаются квази-параллельно вышележащим магнитным силовым линиям, в событиях «confined» - квази-перпендикулярно.

## Литература

1. *В.Н. Ишков*, каталог, [http://www.wdcb.ru/stp/data/Solar\\_Flare\\_Events/Fl\\_XXIV.txt](http://www.wdcb.ru/stp/data/Solar_Flare_Events/Fl_XXIV.txt)
2. *Wiegmann T.* // *Solar Phys.*, 2004, **219**, 87
3. *Stupishin A.*, Magnetic Field Library // GitHub. – , URL [https://github.com/Alexey-Stupishin/Magnetic-Field\\_Library](https://github.com/Alexey-Stupishin/Magnetic-Field_Library)
4. *Anfinogentov S.*, GXBox\_prep. // GitHub. – URL [https://github.com/Sergey-Anfinogentov/GXBox\\_prep](https://github.com/Sergey-Anfinogentov/GXBox_prep)
5. *Bakunina, I.A., Mel'nikov, V.F., Shain, A.V., et al.* // *Izv. Krym. Astrofiz. Obs.*, 2022, vol. 117, no. 1, pp. 65–74.
6. *Соловьев А.А.* // *Астрофизика*, 1985, том 23, выпуск 2, стр. 394-408
7. *A. A. Solov'ev and E. A. Kirichuk* Force-free magnetic flux ropes: inner structure and basic properties // *MNRAS* **505**, 4406–4416 (2021) // Advance Access publication 2021 June 2
8. *A.A. Solov'ev* Force-free magnetic flux ropes: String confinement of super-strong magnetic fields and flare energy release // *MNRAS* **515**, 4981–4989 (2022)

**Спасибо за внимание!**