

ЭФФЕКТ СОКРАЩЕНИЯ КОРОНАЛЬНЫХ ПЕТЕЛЬ ВО ВРЕМЯ ВСПЫШКИ 24.02.2023

Мельников В.Ф.¹, Мешалкина Н.С.²

¹Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

²Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

CONTRACTION EFFECT OF CORONAL LOOPS DURING THE FLARE OF FEBRUARY 24, 2023

Melnikov V.F.¹, Meshalkina N.S.²

¹Pulkovo Observatory of RAS, St.-Petersburg, Russia

²Institute of Solar-Terrestrial Physics of SB RAS, Irkutsk, Russia

<https://doi.org/10.31725/0552-5829-2023-215-218>

In this work, the dynamics of loop-like structures and accompanying phenomena during the flare of 02/24/2023 were studied. A new character of the dynamics of the system of hot coronal loops during a flare has been discovered: 1) in contrast to previously known cases, the contraction of the loops is observed both in the growth and decay phases of the flare; 2) a sharp decrease in height began with the appearance of intense non-stationary plasma ejections observed in the vicinity of these loops and one of their footpoints. It is concluded that the rapid (at a speed of up to 25 km/s) contraction of the system of magnetic loops can be explained by the dissipation of free magnetic energy (a decrease in the magnetic field ϕ -component) caused by the observed non-stationary plasma ejections from the vicinity of these loops (magnetic flux ropes), as well as possible Joule dissipation of electric currents in the loops.

Введение

В 2000-х годах в солнечных вспышках было открыто явление сокращения (уменьшения) размеров вспышечных петель на начальной (импульсной) фазе вспышки [1, 2]. Известная, так называемая, "Стандартная Модель" вспышки [3], напротив, предполагала увеличение высоты петель и увеличение расстояния между их основаниями по мере подъёма области пересоединения силовых линий магнитного поля в вертикальном токовом слое. В проанализированных в [1, 2] вспышках увеличение размеров петель наблюдалась только на фазе спада вспышек. На этом несоответствия наблюдаемой динамики петель со "Стандартной моделью" не заканчиваются. В нашей недавней работе [4] рассмотрен пример вспышки, в которой имел место прямо противоположный процесс: подъём петли на фазе роста и опускание петли на фазе спада. Мы интерпретировали такой характер пространственной динамики вспышечной петли резким увеличением электрического тока в петле, произошедшим в самом начале вспышки в результате наблюдаемого слияния этой петли с петелькой вблизи одного из оснований вспышечной петли, и, наоборот, уменьшением тока из-за джоулевых потерь в максимальной фазе и на фазе спада вспышки. Это объясне-

ние основано на результатах модельных расчётов баланса магнитных сил, выполненных в работах [5, 6].

В настоящей работе мы сообщаем ещё об одной интересной особенности, обнаруженной при анализе динамики вспышечного процесса во вспышке 24.02.2023. В ней сокращение размера (опускание) корональных петель происходило как на фазе роста вспышки, так и на фазе спада.

Результаты анализа

Так же, как и в работе [4], для анализа пространственной динамики корональных петель во время вспышки мы использовали данные об ультрафиолетовом – УФ (AIA/SDO, 171, 193, 211, 335, 094, 131 Å, временное разрешение 12 с), мягком рентгеновском (GOES, интегральный поток в каналах 0.5–4 Å и 1–8 Å), жестком рентгеновском (прибор STIX на спутнике Solar Parker Probe, потоки в пяти энергетических каналах от 4 кэВ до 84 кэВ, временное разрешение 4 с) и микроволновом (Сибирский Радиогелиограф в диапазоне 3–6, 6–12 ГГц, временное разрешение 3 с).

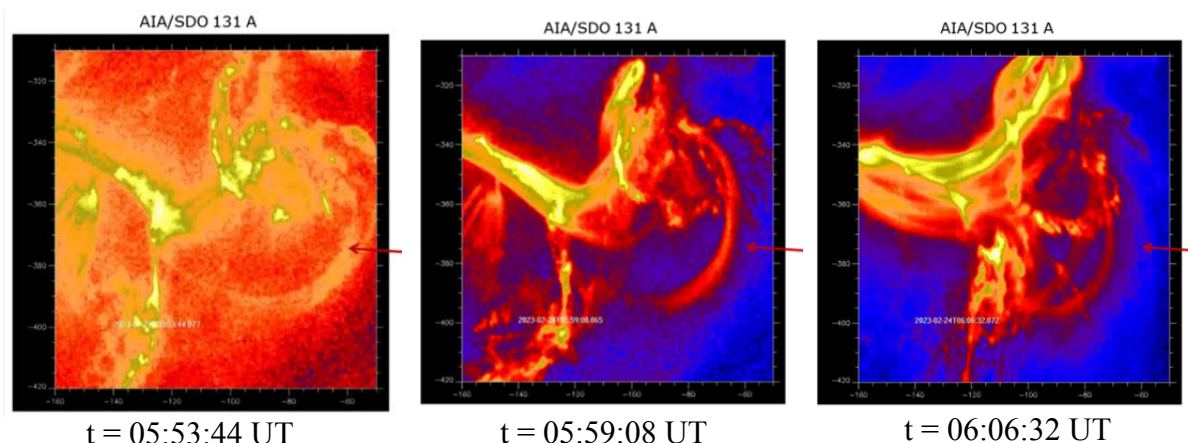


Рис. 1.

На основе фильмов AIA/SDO изучена динамика высоты корональных петель на фазах роста, максимума и спада мощности вспышки 24.02.2023 г. (см. рис. 1 и 2). В области вспышки, перед самым её началом (около 05:50 UT), появилась узкая яркая петельная структура, видимая в УФ излучении. На рис. 1 (верхняя панель слева) в правом нижнем углу панели видно изображение петли по данным AIA/SDO в канале 131 Å на момент времени 05:53:44. На других панелях показано, как менялись пространственная структура вспышки и положение выбранной петли на разных фазах вспышки. Положение петли отмечено концом красной стрелки. Яркие дугообразные жёлтые ленты в центре и левой части панели – УФ вспышечные ленты. Координаты по осям X и Y приведены в угловых секундах. Свечение в «горячей» линии 131 Å свидетельствует о том, что плазма в этой структуре разогрета до температуры порядка 10^7 К, характерной для вспышечных петель.

На рис. 2 показаны: (а) временные профили полного потока радиоизлучения по данным Сибирского радиогелиографа на нескольких частотах в

диапазоне 3–6 ГГц; (б) временные профили мягкого рентгеновского излучения GOES (синяя и красная кривые); (с) временные профили изменения наблюдаемой высоты петельной структуры по данным AIA/SDO в линиях 131 Å (синяя кривая), 171 Å (фиолетовая), 211 Å (зеленая). Изменение расстояния между основаниями петельной структуры в линии 131 Å показано розовой линией; (д) временные профили рентгеновского излучения вспышки по данным STIX. Вертикальные штриховые линии отмечают моменты времени 05:53:54; 06:01:44; 06:03:00 UT.

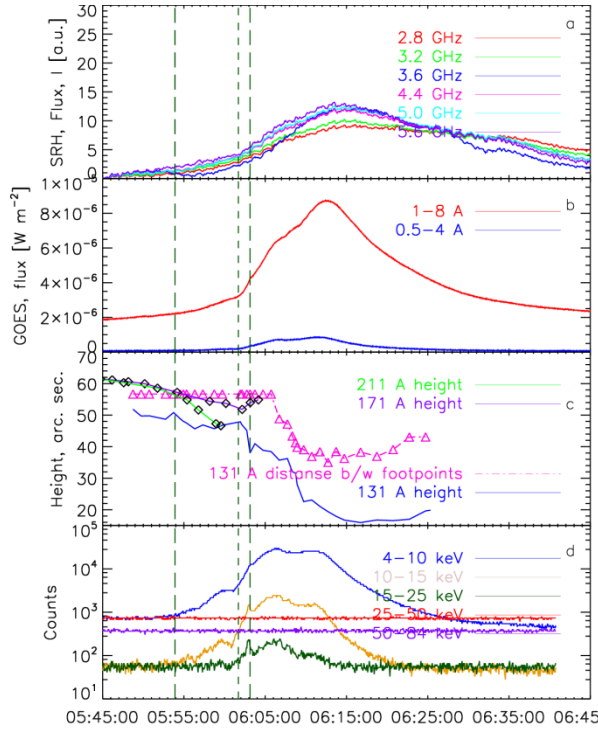


Рис. 2.

спада импульсного ЖР (15–25 кэВ) излучения, совпадающего со временем максимума микроволнового излучения (06:15 UT). Относительное уменьшение высоты составило более 50%.

Обсуждение

В целом, обнаруженное уменьшение высоты системы корональных петель не согласуется со следствиями "Стандартной модели" вспышки, которая предполагает увеличение высоты петель. Но оно вполне согласуется с моделью, связывающей уменьшение размера петли (магнитного жгута) с уменьшением азимутальной (вихревой) компоненты магнитного поля в процессе энерговыделения. Уравнение баланса магнитных сил и силы тяжести в отсутствие поперечной составляющей внешнего поля можно записать в виде [5, 6]: $F_1 + F_2 + F_3 = 0$, где $F_1 = (B_z^2 + B_\phi^2)/4\pi h$ – сила магнитного давления, B_z – компонента магнитного поля вдоль оси петли, B_ϕ – вихревая компонента поля, h – высота петли, $F_2 = -B_z^2/4\pi h$ – сила натяжения силовых линий, $F_3 = -\rho g$ – сила тяжести в гравитационном поле Солнца.

Чем может быть вызвано уменьшение вихревой компоненты магнитного поля B_ϕ ? Имеется, по крайней мере, две возможных причины. Первая

В отличие от вспышки 15.01.2023, исследованной нами в работе [4], на фазе роста интенсивности вспышки 24.02.2023 существенного увеличения высоты корональных петель не наблюдается. Напротив, узкая петельная структура двигалась вниз как единое целое со средней скоростью ~ 5 км/с в течение начальной фазы роста жёсткого рентгеновского (ЖР) излучения (с 05:50 UT до 06:03 UT). За две минуты до момента основного пика ЖР излучения (06:06 UT) началось резкое уменьшение высоты нижней границы системы корональных петель (со скоростью ~ 25 км/с). Оно продолжалось около 10 минут, практически до конца фазы

– это диссипация свободной магнитной энергии $W_f = B_\phi^2/8\pi$ в петле из-за джоулевых потерь $P_j = j^2/\sigma$ вследствие аномально низкой проводимости плазмы σ в области вспышечного энерговыделения. То, что нагрев в петле действительно имеет место, следует из высокой (до 10^7 K) температуры плазмы в наблюдаемых корональных петлях. Второй причиной уменьшения B_ϕ может быть уменьшение свободной магнитной энергии $W_f = B_\phi^2/8\pi$ в петле из-за выбросов плазмы с в замороженным магнитным полем. По нашему мнению, указанием на такую возможность служит то, что начало наблюдаемого резкого уменьшения высоты петли ($t = 06:03$ UT) совпало с началом серии нестационарных высокотемпературных ($T \sim 10^7$ K) выбросов, исходящих из области левого основания петли (см. рис. 1, правая панель). Модельные расчёты показывают, что максимум вихревой (B_ϕ) компоненты магнитного поля находится именно на периферии жгута, в области внешней оболочки (петли). Поэтому, если жгут взаимодействует вблизи основания петли с другой петлёй (магнитным жгутиком), то пересоединяться и выбрасываться будет в первую очередь именно вихревая компонента магнитного поля. Соответственно, теряться (выбрасываться) будет также именно энергия вихревой компоненты $W_f = B_\phi^2/8\pi$.

Выводы

В настоящей работе исследована динамика петлеобразных структур и сопутствующих ей явлений во время вспышки 24.02.2023.

Обнаружен новый характер динамики системы корональных петель во время вспышки, заключающийся в том, что: 1) в отличие от ранее известных случаев видимого сокращения на фазе роста интенсивности излучения вспышки и расширения вспышечных петель на фазе спада, во вспышке 24.02.2023 сокращение (опускание) петли наблюдается как на фазе роста вспышки, так и на фазе спада; 2) резкое уменьшение высоты началось с появлением интенсивных нестационарных потоков (выбросов) горячей плазмы, наблюдаемых в непосредственной близости от изучаемой системы петель, вблизи их оснований. Сделан вывод, что быстрое (со скоростью от ~ 5 до 25 км/с) сжатие системы магнитных петель может быть объяснено диссипацией свободной магнитной энергии (уменьшением вихревой компоненты магнитного поля), вызванной наблюдаемыми нестационарными эрупциями плазмы из окрестностей этих петель, а также возможной джоулевой диссипацией электрических токов в петлях.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ, грант № 22-12-00308.

Литература

1. Sui, L., & Holman, G.D. // *ApJ*, 2003, 596, L251.
2. Li, Y.P., & Gan, W.Q. // *ApJ*, 2005, 629, L137.
3. Kopp, R.A., & Pneuman, G.W. // *Sol. Phys.*, 1976, 50, 85.
4. Melnikov V.F., Meshalkina N.S. // *Geomag. Aeronomy*, 2023, 63, 192
5. Соловьев А.А. // *Астрофизика*, 1985, 23, 394-408
6. Zaitsev, V.V., Stepanov, A.V. // *Geomag. Aeronomy*, 2020, 60, 915