

РОЛЬ КРУПНОМАСШТАБНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ТОКОВ В НАГРЕВЕ КОРОНАЛЬНОЙ ПЛАЗМЫ В СПОКОЙНЫЕ ВРЕМЕННЫЕ ИНТЕРВАЛЫ И ВО ВРЕМЯ ВСПЫШЕК

Фурсяк Ю.А.

Крымская астрофизическая обсерватория РАН, п. Научный, Республика Крым, Россия

THE ROLE OF LARGE-SCALE ELECTRIC CURRENTS IN THE HEATING OF CORONAL PLASMA DURING QUIET TIME INTERVALS AND DURING SOLAR FLARES

Fursyak Yu.A.

Crimean astrophysical observatory of RAS, Nauchny, Crimea, Russia

<https://doi.org/10.31725/0552-5829-2023-329-332>

The study of temperature distribution maps in the corona above the active region (AR) NOAA 12192 for the time interval of October 22–25, 2014 made it possible to detect a dynamic structure with a temperature of more than 10 MK, which apparently indicates a channel of large-scale electric current discovered earlier, on coronal heights. The existence of a high-temperature coronal structure for several days indicates a stationary (quasi-stationary) mode of heating of the coronal plasma due to ohmic dissipation of large-scale electric current. The calculations show that to heat a coronal loop (a system of loops) with a length of about 10^{10} cm to a temperature of 10 MK in a few hours, the electric current in the corona of about 10^9 A is required, which is four orders of magnitude less than the large-scale electric current measured at the photosphere level. Several hours before X class roentgen solar flares, a decrease in the total area occupied by the high-temperature structure and even a decrease in the temperature in it to values of 3–5 MK were noted, which may indicate a change in the physical conditions in the corona before the solar flare process.

Ранее [1] в активных областях (АО) NOAA 12192 и 12371 вне времени солнечных вспышечных событий были обнаружены корональные петли и структуры с температурой ≥ 10 МК. Было высказано предположение, что подобные структуры обозначают собой канал крупномасштабного электрического тока [2] на корональных высотах. Для АО NOAA 12192 данное предположение подтверждается результатами численного моделирования, выполненного в 2016 году [3]. Здесь ставится задача изучить поведение высокотемпературной структуры в области NOAA 12192 за временной интервал 22–25 октября 2014 года и оценить вклад крупномасштабного тока в нагрев корональной плазмы.

Крупномасштабный электрический ток обнаруживался так же, как и в [2]. В вычислениях использовались магнитографические данные инструмента HMI/SDO [4]. Детектирование распределенного на большой площади электрического тока осуществлялось путем анализа распределения вектора непотенциальной компоненты поперечного магнитного поля $\mathbf{B}_\perp$ в фотосфере и выделения регулярных вихревых структур вокруг крупных пя-

тен в АО. Величина крупномасштабного электрического тока I_{distr} рассчитывалась по карте распределения вертикального электрического тока [5] в фотосфере как результирующий ток в контуре, внутри которого вектор $\mathbf{B}_{\perp}$ имеет одно преобладающее направление закрутки. Динамика величины I_{distr} в АО NOAA 12192 за время ее мониторинга представлена на рис. 1 (жирная черная кривая).

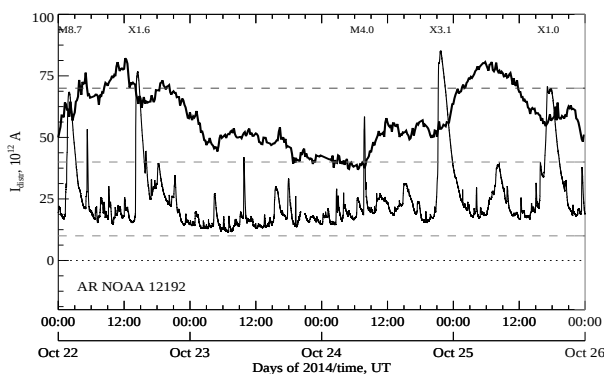


Рис. 1.

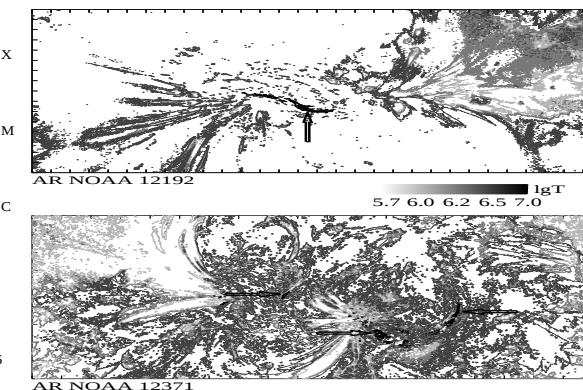


Рис. 2.

Карты распределения температуры над исследуемой АО были построены так же, как и в [6], т.е., используя данные об интенсивности УФ излучения в каналах 131, 171, 193 и 211Å инструмента AIA/SDO [7] и функцию отклика $K_i(T)$ как маркер соответствия определенной температуре (температурному диапазону). Пример карты распределения температуры в короне над АО NOAA 12192 для начального момента ее мониторинга (00:00UT 22 октября 2014 года) представлен на рис. 2. Высокотемпературная структура отмечена на рисунке стрелкой.

Изучение динамики высокотемпературной структуры в короне над АО NOAA 12192 на протяжении 22–25 октября 2014 года показало следующие результаты:

1. Структура с температурой ≥ 10 МК наблюдается большую часть времени мониторинга исследуемой АО. Если она действительно представляет собой канал крупномасштабного электрического тока на корональных высотах, то это означает, что нагрев корональной плазмы идет в стационарном (квазистационарном) режиме. Эффективный квазистационарный нагрев вещества короны за счет омической диссипации электрических токов возможен только при определенных условиях: требуется аномальная проводимость плазмы [8] и филаментация токового канала [9]. Как видно из рис. 3, высокотемпературная структура действительно состоит из отдельных более мелких элементов с поперечным сечением порядка 10^8 см. Выполненные оценочные расчеты показывают, что при таких условиях нагрев корональной плазмы электрическими токами становится возможным.

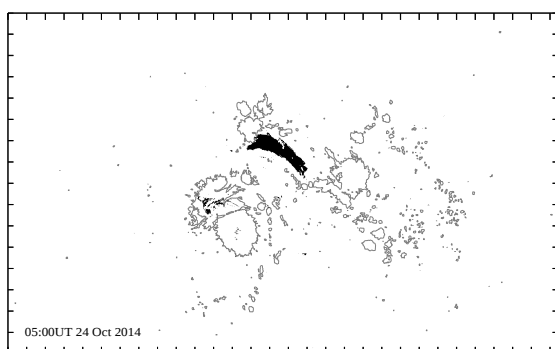


Рис. 3.

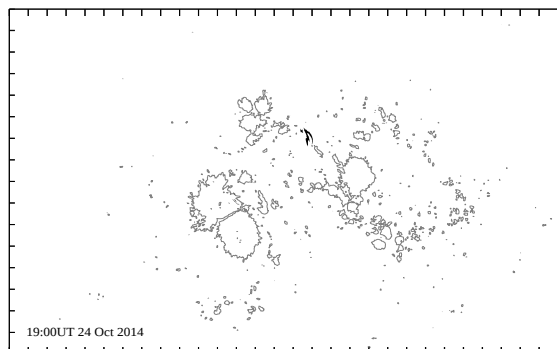


Рис. 4.

2. Интересно оценить, каким по абсолютной величине должен быть электрический ток в короне, чтобы при условии аномальной проводимости плазмы нагреть систему корональных петель длиной 10^{10} см и поперечным сечением 10^8 см до температуры в 10 МК за несколько часов ($\sim 10^4$ с). Расчеты показали, что величина тока должна быть $\sim 10^9$ А, что на 4 порядка меньше, чем полученные значения крупномасштабного электрического тока в АО NOAA 12192 ($\sim 10^{13}$ А), измеряемого на уровне фотосферы.

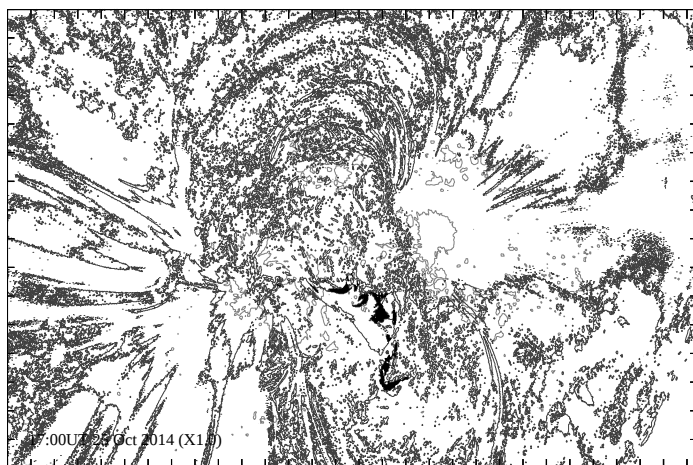
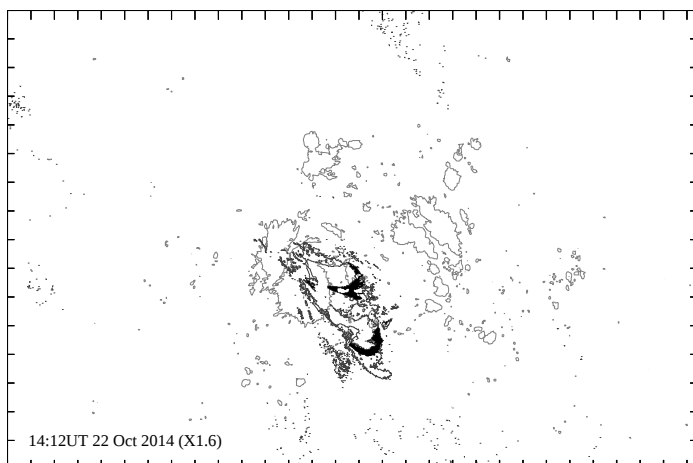


Рис. 5.

3. За несколько часов до вспышек рентгеновских классов X, зафиксированных в АО за время ее мониторинга, отмечено (рис. 4) уменьшение площади, занимаемой структурой с $T \geq 10$ МК, и даже понижение температуры в ней до значений 3–5 МК. Данное наблюдение указывает на возможное изменение физических условий в короне перед мощными вспышками и начало аккумуляции энергии для ее дальнейшего взрывного выделения. При наборе достаточной статистики данный эффект может служить одним из критериев сверхкраткосрочного (порядка нескольких часов) прогноза вспышек высокой мощности.

4. Во вспышках (рис. 5) высокотемпературная структура ведет себя по-разному, что говорит об уникальности каждого вспышечного процесса и его сложности. Установить роль электрических токов в нагреве корональной плазмы во время вспышки крайне сложно, поскольку здесь оказываются задействованы множественные механизмы нагрева. Если в результате перезамыкания силовых линий магнитного поля токовый канал разрывается, то может произойти процесс, подобный короткому замыканию, и в результате тепловыделение многократно возрастает (закон Джоуля-Ленца), как это зафиксировано во вспышке рентгеновского класса X1.0 25 октября 2014 года (нижняя панель рис. 5).

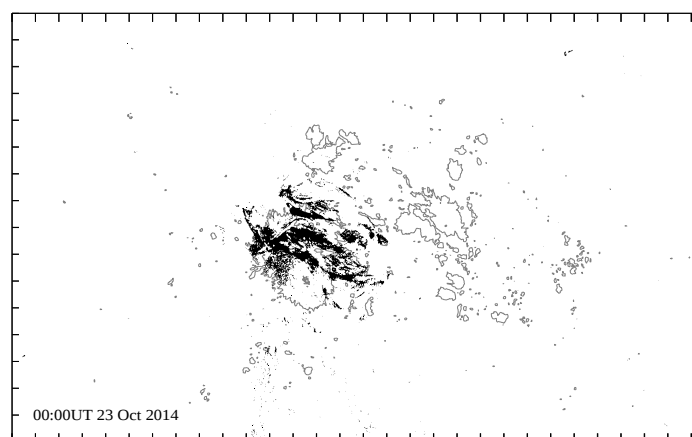


Рис. 6.

5. После вспышек рентгеновских классов X (рис. 6) структура в короне с $T \geq 10$ МК существенно увеличивает свою площадь на некоторое время, что можно объяснить послевспышечным свечением корональных петель, изменениями условий в корональной плазме и восстановлением токового канала после вспышки.

Работа выполнена при поддержке грантом РНФ №22-72-00124.

Литература

1. Фурсяк Ю.А. // ССЗФ-2022. Труды, Санкт-Петербург, 2022, с. 283-286.
2. Fursyak Yu.A., Kutsenko A.S., Abramenko V.I. // Solar Phys., 2020, vol. 295, article id. 19.
3. Jiang C., Wu S.T., Yurchyshyn V. // Astrophys. J., 2016, vol. 828, article id. 62.
4. Pesnell W.D., Thompson B.J., Chamberlin P.C. // Solar Phys., 2012, vol. 275, pp. 3-15.
5. Fursyak Yu.A. // Geomagnetism and Aeronomy, 2018, vol. 58, pp. 1129-1135.
6. Fursyak Yu.A. // Astrophysics, 2023, vol. 66, pp. 242-257.
7. Lemen J.R., Title A.M., Akin D.J., et al. // Solar Phys., 2012, vol. 275, pp. 17-40.
8. Zaitsev V.V., Stepanov A.V. // Physics Uspekhi, 2008, vol. 51, pp. 1123-1160.
9. Solov'ev A.A. // MNRAS, 2022, vol. 515, pp. 4981-4989.