

КРУПНОМАСШТАБНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТОКИ В ПРОЦЕССАХ НАГРЕВА КОРОНЫ СОЛНЦА

Фурсяк Ю.А.

Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Научный, Республика Крым, Россия

LARGE-SCALE ELECTRIC CURRENTS IN SOLAR CORONAL HEATING PROCESSES

Fursyak Yu.A.

Crimean astrophysical observatory of RAS, Nauchny, Crimea, Russia

We used magnetographic data of the Helioseismic and Magnetic Imager (HMI/SDO) instrument on the spatial distribution of the magnetic field vector components in the solar photosphere and data of the Atmospheric Imaging Assembly (AIA/SDO) instrument on the intensity of ultraviolet (UV) radiation in 131, 171, 193 and 211Å channels. The magnetographic data were used to detect the large-scale electric current and calculate its value. Data on the intensity of UV radiation were used to calculate the total intensity of radiation in 131, 171, 193, and 211Å channels and to further calculate the temperature in the corona above the active region (AR). The objects of study were 3 ARs with different levels of flare productivity – NOAA 12192, 12371 and 12494. For each AR, plots of time variations in the average temperature in the corona and large-scale electric current are plotted. It is shown that: 1) The heating of the corona due to the ohmic dissipation of large-scale electric currents proceeds in a stationary/quasi-stationary mode; 2) The increase in temperature in the corona above the AR during the flare events of high roentgen classes is not directly related to the dynamics of large-scale electric current, but is due to processes at coronal heights. One of the important results of the study was the discovery in the NOAA 12192 region of a large-scale electric current channel at coronal heights by constructing a pixel-by-pixel map of the temperature distribution in the corona and fixing a localized region of high temperature (above 10 MK).

DOI: 10.31725/0552-5829-2022-283-286

Нагрев солнечной короны до температур в миллионы Кельвинов до сегодняшнего дня остается одной из нерешенных проблем физики Солнца. Среди совокупности возможных механизмов нагрева коронального вещества рассматривается и омическая диссипация электрических токов [1, 2].

Ранее нами, анализируя пространственное распределение вектора непотенциальной компоненты поперечного магнитного поля на уровне солнечной фотосферы, были обнаружены в активных областях (АО) крупномасштабные электрические токи [3]. Имелись косвенные указания на то, что крупномасштабный ток выходит в верхние слои солнечной атмосферы, и, следовательно, должен быть связан с процессами в короне. В частности, было показано, что крупномасштабный ток связан со вспышками, поскольку его величина и временные вариации коррелируют с изменениями уровня вспышечной активности АО. Однако известно, что во вспышках выделяется лишь несколько процентов энергии непотенциальных магнит-

ных полей, выносимой в корону электрическими токами [4]. Большая же часть этой энергии расходуется на иные процессы, включая, в том числе, и нагрев коронального вещества. Таким образом, задачей исследования является установления характера зависимости между динамикой крупномасштабного электрического тока и временными вариациями температуры в короне.

Вычисление средней температуры в короне над АО осуществлялось следующим образом. Для каждого из четырех анализируемых каналов инструмента AIA/SDO [5] (131, 171, 193, 211Å) была рассчитана интегральная интенсивность ультрафиолетового (УФ) излучения. Далее, используя зависимость «функция отклика – $\lg T$ » [5] и имеющиеся значения суммарной интенсивности УФ-излучения в отдельных каналах, программно были получены данные о величине температуры, которые и являются искомым усредненным значением.

В работе исследованы три АО с разным уровнем вспышечной продуктивности – область NOAA 12192 с высокой активностью (зафиксировано несколько вспышек рентгеновского класса X), NOAA 12371 со средней активностью (вспышки рентгеновских классов C и M) и область с низкой активностью NOAA 12494. С целью минимизации ошибок в расчетах, возникающих за счет эффекта проекции, мониторинг каждой АО осуществлялся на протяжении 3-4 суток, на протяжении которых область находилась в пределах $\pm 35^\circ$ относительно центрального солнечного меридиана.

Анализ динамики крупномасштабного электрического тока и средней температуры в короне над АО показывает следующее (Рис. 1):

1. Для всех трех исследуемых АО значения средней температуры в короне вне солнечных вспышек одинаковы и равны приблизительно 1.5 МК ($\lg T = 6.2$). Поскольку величина крупномасштабного тока в анализируемых областях разная, можно предположить, что нагрев короны за счет омической диссипации крупномасштабных электрических токов идет в стационарном/квазистационарном режиме.

2. Во время солнечных вспышек рентгеновских классов M и X в областях NOAA 12192 и 12371 наблюдается рост средней температуры в короне над АО до значений 2.0-3.2 МК ($\lg T = 6.3-6.5$). Однако видно, что нарастание температуры здесь не связано непосредственно с динамикой крупномасштабного электрического тока, а обусловлено иными процессами на корональных высотах.

3. Обращает на себя внимание падение средней температуры в короне над областью NOAA 12494 в последние 6-8 часов ее мониторинга до значений в 0.2 МК ($\lg T = 5.3$). В этот же временной интервал величина крупномасштабного тока становится близкой к нулю. Данное наблюдение может указывать на возможное «выключение» механизма нагрева короны над АО посредством омической диссипации электрического тока. Однако, для подтверждения данного предположения требуется больше статистического материала.

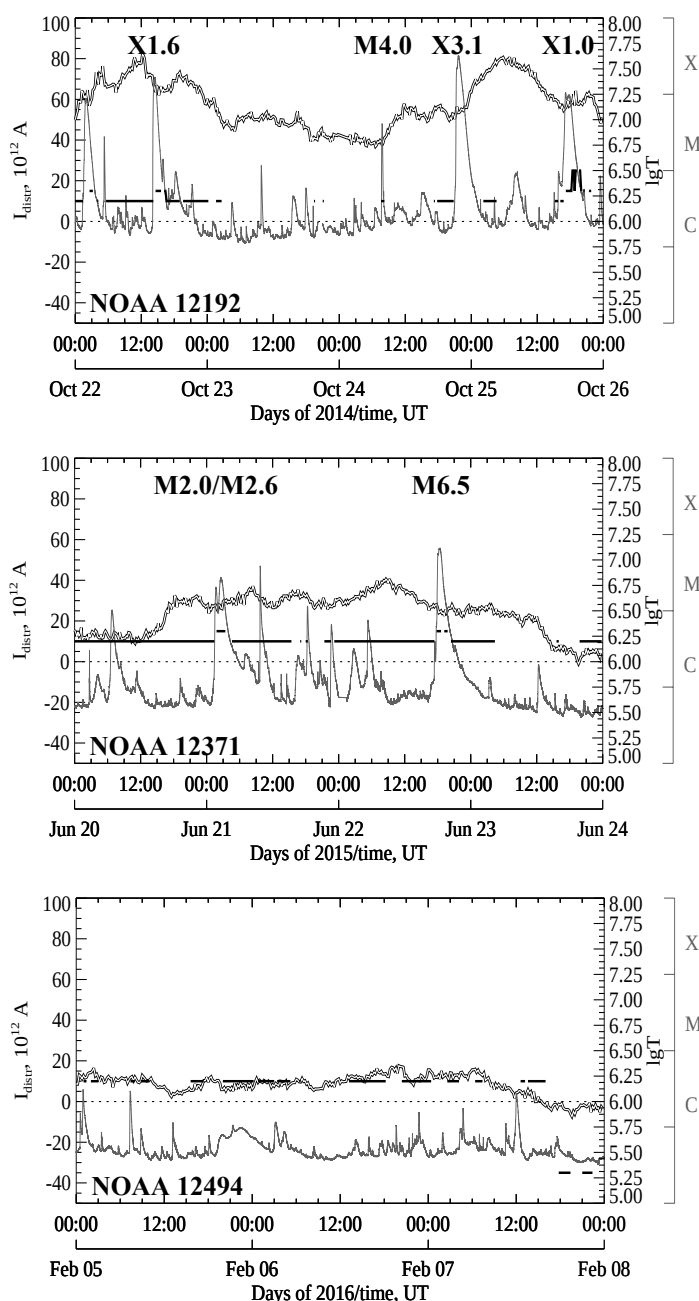


Рис. 1. Динамика крупномасштабного электрического тока (двойная кривая), средней температуры в короне над АО и потока рентгеновского излучения в диапазоне 1–8Å в исследуемых областях за время их мониторинга (по данным GOES-15). Указаны наиболее мощные вспышки, зафиксированные в АО. Тонким пунктиром отмечен нулевой уровень величины крупномасштабного тока.

Ранее [3] мы полагали, что существующий в данной области крупномасштабный ток выходит в корону над большим пятном отрицательной

Аналогично вычислению средней температуры в короне над АО, имея карты распределения интенсивности УФ-излучения в четырех анализируемых каналах и зная зависимость «функция отклика – $\lg T$ », имеется возможность попиксельного построения температурной карты для заданной области и для конкретного момента времени. Построенные таким образом карты распределения температуры в короне для моментов времени, совпадающих с началом мониторинга областей NOAA 12192 и 12371 показаны на рис. 2. На подобных картах можно увидеть корональные петельные структуры. Ближе к основанию петель температура ниже (около 1 МК), в то время как их верхние части имеют температуру в несколько миллионов Кельвинов, а отдельные участки сравнительно небольшой площади – температуру выше 10 МК ($\lg T > 7.0$). Особо ценным стало обнаружение достаточно большого участка высокой температуры (> 10 МК) в короне над областью NOAA 12192 (см. рис. 2, левая нижняя панель).

полярности в хвостовой части АО и замыкается на обширной области слабых магнитных полей положительной полярности на юго-западе АО. Наши предположения были подтверждены численным моделированием [6]. Здесь же появляется возможность обнаружить канал крупномасштабного электрического тока в короне на основе наблюдательных данных путем расчета температуры на корональных высотах и обнаружения участков с высокими ее значениями.

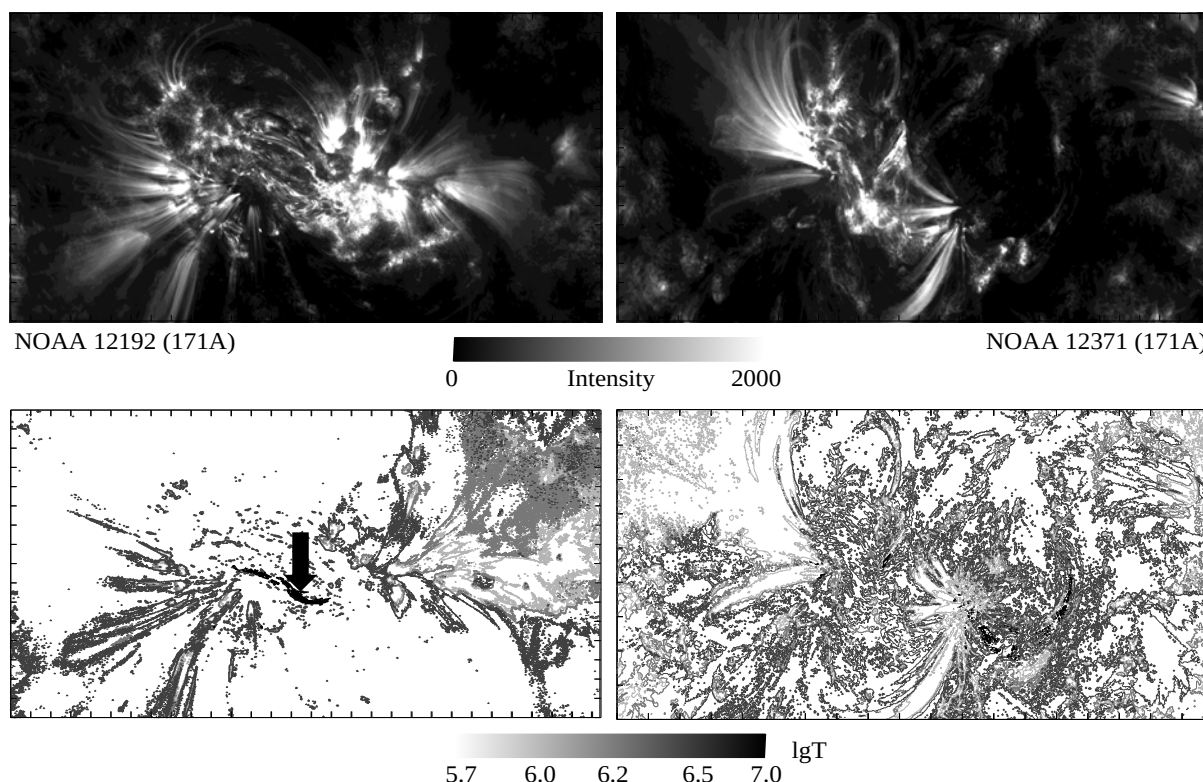


Рис. 2. Вверху – карты распределения интенсивности УФ-излучения в канале $171\text{\AA}$ в короне над областями NOAA 12192 (слева) и 12371 (справа) на моменты времени соответственно 00:00UT 22.10.2014 г. и 00:00UT 20.06.2015 г. Внизу карты распределения температуры в короне для тех же моментов времени. Для области NOAA 12192 в центральной части заметен участок высокой (>10 МК) температуры (указано стрелкой), являющийся вероятным треком канала крупномасштабного электрического тока на корональных высотах.

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

Литература

1. *Spicer D.C.* 1991. In *Ulmschneider P., et al. (Eds), Mechanisms of Chromospheric and Coronal Heating*. Berlin: Springer-Verlag, p. 547.
2. *Zaitsev V.V., Stepanov A.V.* // *Physics Uspekhi*, 2008, vol. 51, pp. 1123–1160.
3. *Fursyak Yu.A., Kutsenko A.S., Abramenko V.I.* // *Solar Phys.*, 2020, vol. 295, article id. 19.
4. *Zaitsev V.V., Stepanov A.V., Urpo S., Pohjolainen S.* // *Astron. Astrophys.*, 1998, vol. 337, pp. 887–896.
5. *Lemen J.R., Title A.M., Akin D.J., et al.* // *Solar Phys.*, 2012, vol. 275, pp. 17–40.
6. *Jiang C., Wu S.T., Yurchyshyn V.* // *Astrophys. J.*, 2016, vol. 828, article id. 62.