

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТОКИ РАЗНЫХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ МАСШТАБОВ В АКТИВНОЙ ОБЛАСТИ: СТРУКТУРА, ДИНАМИКА, СВЯЗЬ СО ВСПЫШКАМИ

Ю.А. Фурсяк, В.И. Абраменко, А.С. Куценко

Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Научный, Россия
yuri_fursyak@mail.ru

ELECTRIC CURRENTS OF DIFFERENT SPATIAL SCALES IN AN ACTIVE REGION: STRUCTURE, DYNAMICS, AND RELATION TO SOLAR FLARES

Yu.A. Fursyak, V.I. Abramenko, A.S. Kutsenko

Crimean Astrophysical Observatory of RAS, Nauchny, Russia
yuri_fursyak@mail.ru

Аннотация. По данным инструмента Helioseismic and Magnetic Imager на борту Solar Dynamics Observatory (HMI/SDO), проведен анализ структуры магнитных полей и вертикальных электрических токов в трех активных областях (АО) текущего цикла солнечной активности. Предложена методика обнаружения в АО распределенных по большой площади крупномасштабных токовых структур — глобальных электрических токов. Показано, что: 1) глобальные токи более тесно связаны с корональной динамикой, чем мелкомасштабные токи; 2) электрические токи создают в атмосфере Солнца «энергетических резервуар» для вспышечного энерговыделения; 3) токи не являются триггерным механизмом для вспышек.

Ключевые слова: Солнце, магнитные поля, электрические токи, солнечные вспышки.

Abstract. Using the data providing to the Helioseismic and Magnetic Imager instrument onboard Solar Dynamics Observatory (HMI/SDO), the structure of magnetic fields and vertical electric currents for the three active regions (AR) of the current solar activity cycle was analyzed. The method of detection of large-scale electric current structures distributed over a large area — global electric currents — was proposed. It was shown that: 1) global currents are more closely related to coronal dynamics compared with small-scale electric currents in the photosphere; 2) electric currents create an “energy reservoir” that can feed solar flares in the solar atmosphere; 3) electric currents are not sufficient triggers for solar flares.

Key words: Sun, magnetic fields, electric currents, solar flares.

ВВЕДЕНИЕ

Исследование структуры и динамики электрических токов является одним из важных направлений исследований в современной физике Солнца. Способствуют этому как появление современных инструментов, так и новые модели, которые были бы неполными без учета динамики токовых структур.

В данной работе мы уходим от традиционных методов и подходов к изучению токовых систем в АО и строим свои исследования по аналогии с работой 80-х гг. 20-го в. [Абраменко, Гопасюк, 1987]. Используя интегральный метод расчета величины вертикального электрического тока и современные данные о структуре магнитных полей в активных областях (АО), мы ставим перед собой задачу выявить наличие крупномасштабных (глобальных) токовых структур в исследуемых областях, и изучить характер временных изменений интегральных характеристик вертикального тока и величины глобального тока в АО с разным уровнем вспышечной активности.

ДАнные НАБЛЮДЕНИЙ

Основной объем работы выполнен на данных инструмента Helioseismic and Magnetic Imager [Scherrer et al., 2012], установленного на борту Solar Dynamic Observatory [Pesnell et al., 2012] (HMI/SDO), и доступных на сайте Joint Science Operation Centre (JSOC) [<http://jsoc2.stanford.edu/ajax/lookdata.html>]. Используются SHARP (Spaceweather HMI Active Region Patch, [Bobra et al., 2014]) магнитограммы компонент вектора магнитного поля в фотосфере трех различных по параметрам областей текущего цикла активности Солнца — NOAA12192, NOAA12381 и NOAA12494.

Время мониторинга каждой области совпадает с периодом нахождения ее в пределах $\pm 35^\circ$ от центрального меридиана, что позволяет минимизировать ошибки в вычислении электрических токов, вносимые эффектом проекции.

ТОКИ РАЗНЫХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ МАСШТАБОВ И ИХ ДИНАМИКА В ИССЛЕДУЕМЫХ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЯХ

Для вычисления вертикальных электрических токов в данной работе нами применен интегральный метод. Особенности метода и его преимущества детально рассмотрены в [Fursyak, 2018]. Пример карты распределения величины плотности вертикального тока для одной из исследуемых АО представлен на рис. 1.

Для каждой из исследуемых областей нами вычислен ряд интегральных характеристик вертикальных электрических токов и исследована их динамика. На рис. 1 (справа) представлен график временных изменений величины суммарного тока $\sum |I_z|$ в АО NOAA12192 за период мониторинга. Видно, что изменения величины $\sum |I_z|$ не отображают корональную динамику АО. Связано это с тем, что мелкомасштабные структуры вертикального тока являются замкнутыми в низких петлях в пределах фотосферы, о чем свидетельствует низкий разбаланс тока в исследуемых областях (0.007 % для NOAA 12381, -0.047 % для NOAA 12494, и -0.513 % NOAA 12192).

На карте распределения величины вертикального тока хорошо видны мелкомасштабные токи и протяженные структуры, являющиеся, по-видимому, отображением горизонтальных токовых жгутов. Для обнаружения крупномасштабных токов нами приме-

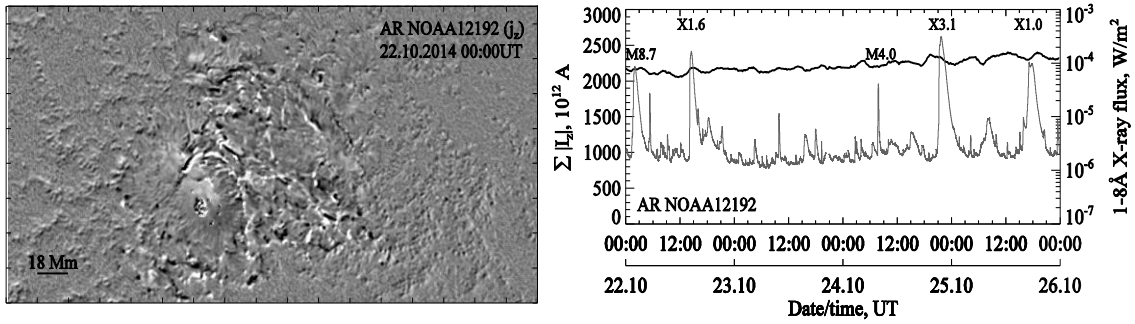


Рис. 1. Слева — пример карты распределения величины плотности тока в АО NOAA 12192 22 октября 2014 г. Карта нормирована от -0.025 A m^{-2} (черное) до 0.025 A m^{-2} (белое). Справа — динамика величины $\Sigma |I_z|$ (черная кривая) в области за период мониторинга. Указаны наиболее мощные вспышки, ассоциированные с исследуемой областью

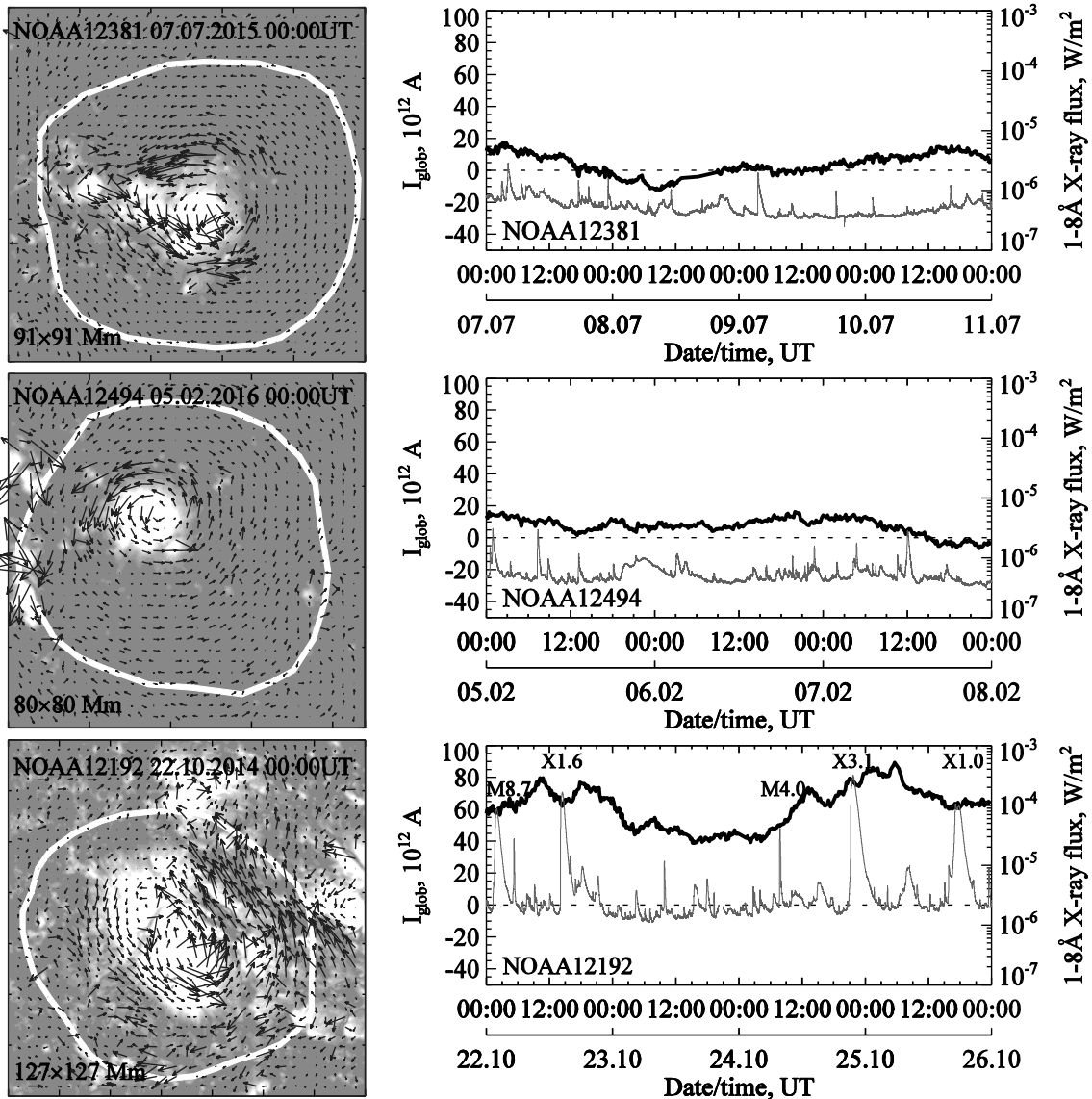


Рис. 2. Слева — участки магнитограмм $|B_z|$ исследуемых АО с наложенными азимутами непотенциальной компоненты поперечного поля (черные стрелки). Жирной белой линией обозначены границы контура, внутри которого рассчитывалась величина глобального тока. Справа — динамика глобального тока (черная кривая) в исследуемых областях за период мониторинга. Указаны наиболее мощные вспышки, ассоциированные с исследуемыми областями

нена методика, предложенная в [Абраменко, Гопасюк, 1987]. На первом этапе мы восстанавливаем потенциальное поле в фотосфере, используя код Сакураи [Sakurai, 1982] и сравниваем потенциальное поле с наблюдаемым поперечным полем АО. Далее

вектор наблюдаемого поперечного магнитного поля раскладывается на две составляющие — вдоль (потенциальная составляющая) и поперек вектора потенциального поперечного магнитного поля (непотенциальная составляющая, обусловленная присут-

ствием тока). После этого строим карты направленной вектора непотенциальной компоненты поперечного магнитного поля (рис. 2, левая панель), на которых хорошо заметны регулярные вихревые структуры вокруг крупных пятен. Оценку величины глобального тока можно получить, очертив контур в окрестности пятна так, чтобы внутри его границ вектор непотенциальной компоненты поля имел преимущественное направление закрутки, и просуммировав токи внутри контура.

Динамика глобального тока различна для областей с разным уровнем вспышечной активности (рис. 2, правая панель). Для АО NOAA 12192 с высокой активностью характерны как более высокие значения величины глобального тока по сравнению с областями NOAA 12381 и NOAA 12494, обладающих низкой активностью, так и существенные колебания величины глобального тока за период мониторинга АО. Нарастание величины глобального тока, как следует из графика на рис. 2, сопровождается значительным усилением вспышечной активности области. В свою очередь, промежуток времени 23–24 октября, на протяжении которого в NOAA 12192 отсутствовали мощные вспышки, связан со спадом величины глобального тока (рис. 2). Помня о низком разбалансе токов в области, можно предположить, что глобальной электрический ток также является замкнутым в пределах АО, охватывая верхние слои атмосферы Солнца и обуславливая непотенциальность магнитных полей в хромосфере и короне. Следовательно, глобальный электрический ток будет связан с корональной динамикой АО. Первые указания на этот факт были приведены в [Abramenko et al., 1991]. Только часть энергии, выносимой в корону глобальным током, будет затрачена на вспышечные процессы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование структуры магнитных полей и электрических токов показало, что в АО существуют токовые структуры различных масштабов. Наиболее крупные из них — глобальные электрические токи — являются распределенными по большой площади и могут быть выявлены только косвенными методами. Токовые структуры всех масштабов являются за-

мкнутыми в пределах АО, на что указывает низкий (меньше 1 %) разбаланс электрических токов во всех трех исследуемых областях.

Динамика как интегральных параметров вертикального электрического тока в фотосфере, так и глобального тока указывает на то, что электрические токи не являются спусковым механизмом для вспышечных процессов, а лишь создают «энергетический резервуар» в верхних слоях атмосферы Солнца. Глобальные токи более тесно связаны с корональной динамикой АО, поскольку, охватывая верхние слои атмосферы Солнца, они обуславливают непотенциальность магнитных полей в хромосфере и короне. Энергия, выносимая глобальным током в корону, может быть затрачена как на вспышки различной мощности, так и на иные диссипативные процессы.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-12-00131.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абраменко В.И., Гопасюк С.И. Система электрических токов и структура магнитного поля активной области // Изв. Крымск. астрофиз. обс. 1987. Т. 76. С. 147–168.
- Abramenko V.I. Relationship between magnetic power spectrum and flare productivity in solar active regions // *Astrophys. J.* 2005. V. 629. P. 1141–1149.
- Abramenko V.I., Gopasiuk S.I., Ogir' M.B. Electric current and $H\alpha$ emission in two active regions on the Sun // *Solar Phys.* 1991. V. 134. P. 287–297.
- Fursyak Yu.A. Vertical electric currents in active region: calculation methods and relation to the flare index // *Geomagnetism and Aeronomy.* 2018. V. 58. Iss. 8. P. 1129–1135.
- Sakurai T. Green's function methods for potential magnetic fields // *Solar Phys.* 1982. V. 76. P. 301–321.
- Scherrer P.H., Schou J., Bush R.I., et al. Design and ground calibration of the Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) instrument on the Solar Dynamics Observatory (SDO) // *Solar Phys.* 2012. V. 275. P. 229–259.
- Kosugi T., Matsuzaki K., Sakao T., et al. The Hinode (Solar-B) mission: an overview // *Solar Phys.* 2007. V. 243. P. 3–17.
- Pesnell W.D., Thompson B.J., Chamberlin P.C. The Solar Dynamics Observatory // *Solar Phys.* 2012. V. 275. P. 3–15.
- Bobra M.G., Sun X., Hoeksema J.T., et al. The Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) Vector Magnetic Field Pipeline: SHARPs — Space-Weather HMI Active Region Patches // *Solar Phys.* 2014. V. 289. P. 3549–3578.