

УДК 523.98

Система глобального тока в активной области

Ю.А. Фурсяк, В.И. Абраменко

ФГБУН “Крымская астрофизическая обсерватория РАН”, Научный, Крым, 298409
yuriy_fursyak@mail.ru

Поступила в редакцию 15 ноября 2017 г.

Аннотация. По SHARP-магнитограммам трех компонент полного вектора магнитного поля, полученным по данным наблюдений HMI/SDO, нами исследованы магнитные поля и вертикальные электрические токи области NOAA 12473.

Первый этап работы предусматривал вычисление и анализ структуры вертикальных электрических токов в фотосфере исследуемой активной области (АО). Расчет вертикальных токов выполнялся интегральным методом с использованием данных о B_x - и B_y -компонентах вектора магнитного поля области. Вычисленные токи оказались более мелкоструктурными, чем магнитные поля, и хорошо сбалансированными (разбаланс 0.022 %). Низкий разбаланс токов позволил сделать вывод о замкнутости локальных токовых структур в низких петлях.

На втором этапе нами восстановлено потенциальное магнитное поле и проведено сравнение потенциального поля с наблюдаемым горизонтальным магнитным полем исследуемой АО. Выявлена регулярная вихревая структура непотенциальной компоненты наблюдаемого магнитного поля вокруг лидера АО, связанная с наличием глобального электрического тока. Глобальный ток в лидере области оказался положительным по знаку (направленным на наблюдателя) и равным 6×10^{12} А по абсолютной величине. Учитывая низкий разбаланс токов в области, можно предположить, что глобальный ток замыкается через хромосферу и корону на остальной части АО и может быть связан с непотенциальностью магнитных полей в верхних слоях атмосферы Солнца.

THE SYSTEM OF GLOBAL ELECTRICAL CURRENTS IN THE SOLAR ACTIVE REGION, *by Yu.A. Fursyak, V.I. Abramenko*. Using the SHARP-magnetograms of three components of the full vector of the magnetic field, obtained from HMI/SDO observations, we investigated the magnetic fields and vertical electric currents of active region NOAA 12473.

The first part of the paper includes calculations and analysis of vertical electrical currents' structure in the photosphere of the active region (AR). Calculations of vertical electrical currents in the AR were performed by the integral method from the B_x , B_y components of the magnetic field vector. The calculated currents were found to be more fragmented than the magnetic field, and highly balanced (the magnitude of imbalance is about 0.022 %). Such a low imbalance level of vertical electrical currents in the AR allowed us to conclude that the local current structures are mostly closed in low loops.

In the second part, we restore the potential magnetic field and compare the potential field with the observed horizontal magnetic field of the AR. We found a regular vortex structure of the non-potential component of the observed magnetic field around the leading sunspot of the AR, associated with the presence of a global electrical current. Global electrical current was found to be positive in sign (directed to observer) and equals to 6×10^{12} A. Taking into account the low imbalance of currents in the AR, one can assume that the global current is closed through the chromosphere and corona on the rest part of

the AR, and may be associated with non-potentiality of magnetic fields in the upper atmosphere levels of the Sun.

Ключевые слова: Солнце, активные области, магнитные поля, вертикальные электрические токи, глобальный электрический ток

1 Введение

Электрические токи – хороший индикатор любых изменений в структуре магнитных полей. Изучая электрические токи, мы получаем возможность исследовать перестройки магнитных полей и тем самым заранее говорить о формировании вспышечно-активных конфигураций. Электрические токи являются показателем накопления в активной области так называемой “свободной” магнитной энергии (Шрайвер и др., 2008), которая реализуется в дальнейшем в серии вспышек различной мощности. Именно поэтому задачи по исследованию эволюции и динамики электрических токов в активных областях являются на сегодня весьма актуальными и востребованными.

Главной задачей данной работы является исследование магнитных полей и электрических токов в активной области, а непосредственными целями – изучение структуры горизонтальных магнитных полей активной области; анализ непотенциальной компоненты магнитного поля и структуры вертикальных электрических токов.

2 Вычисление вертикальных электрических токов

Большинство исследователей для вычисления вертикальных электрических токов используют дифференциальный метод (Витланд, 2000), основанный на законе Ампера в дифференциальной форме:

$$\mu_0 \mathbf{j} = \nabla \times \mathbf{B}, \quad (1)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн м^{-1} – магнитная постоянная в СИ, $\mathbf{B} \equiv (B_x, B_y, B_z)$ – вектор магнитного поля в фотосфере.

Мы же предлагаем, следуя Абраменко и Гопасюку (1987), использовать интегральный метод, обладающий, по сравнению с дифференциальным, рядом преимуществ (Фурсяк, Абраменко, 2017). Этот метод базируется на интегральной форме закона Ампера и формуле Стокса:

$$\mu_0 I_z = \oint_L B_t dl. \quad (2)$$

Для приближенного вычисления интеграла, находящегося в правой части выражения (2), существует несколько методов. Мы остановились на методе Симпсона, отличающегося простотой и достаточно высокой точностью вычислений. Суть метода заключается в приближении подинтегральной функции на некотором отрезке кривой второго порядка. Формула для вычисления интеграла методом Симпсона имеет следующий вид:

$$\int_a^b f(x) dx \approx h/3 [f(x_0) + 4f(x_1) + 2f(x_2) + 4f(x_3) + 2f(x_4) + \dots + 4f(x_{N-1}) + f(x_N)], \quad (3)$$

где $f(x_0), f(x_1), \dots$ – значения подинтегральной функции $f(x)$ в узлах решетки, N – количество узлов, h – величина шага.

Для вычислений интеграла по замкнутому контуру, ограничивающему некоторую поверхность, нам необходимо выбрать положительные направления осей и направление обхода контура. В нашем случае положительное направление оси X совпадает на магнитограмме активной области с направлением восток – запад, а положительное направление оси Y – с направлением юг – север. Направление

обхода контура выбрано нами против часовой стрелки. В этом случае положительный по знаку электрический ток будет направлен вверх, на наблюдателя.

С учетом формулы (3), выбранных нами положительных направлений осей и направления обхода контура, выражение (2) примет следующий вид:

$$I_z = \frac{h}{3\mu_0} [s_1 + s_2 - s_3 - s_4], \quad (4)$$

где величины s_1, s_2, s_3, s_4 являют собой суммы вида (3) компонент вектора горизонтального магнитного поля по четырем сторонам прямоугольного контура, ограничивающего поверхность, внутри которой рассчитывается пронизывающий ее интегральный ток.

Рассчитав коэффициент в правой части выражения (4), мы получаем формулу для вычисления вертикального электрического тока:

$$I_z = [0.009682 \cdot (s_1 + s_2 - s_3 - s_4)] \cdot 10^9 \text{ А}. \quad (5)$$

3 Структура вертикальных электрических токов в исследуемой активной области

В качестве исходного материала для анализа нами были использованы SHARP-магнитограммы трех компонент полного вектора магнитного поля области NOAA 12473 (рис. 1). Данные, доступные на интернет-ресурсе JSOC (Joint Science Operation Centre)¹, получены прибором HMI (Helioseismic and Magnetic Imager) на борту космического аппарата SDO (Solar Dynamic Observatory) (Шеррер и др., 2012) 27 декабря 2015 года, когда исследуемая группа находилась вблизи центра солнечного диска.

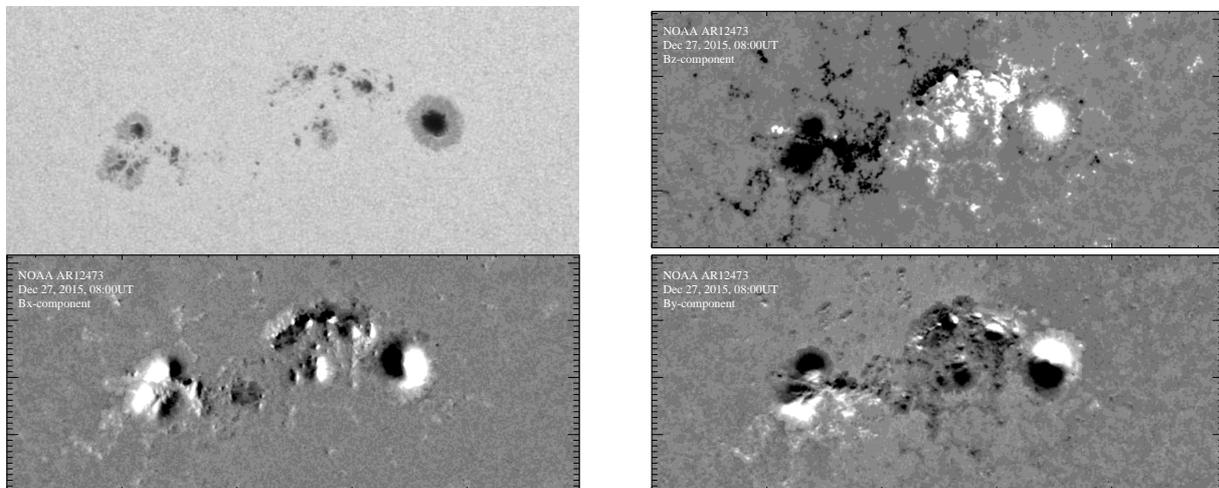


Рис. 1. Фотогелиограмма (слева сверху) и магнитограммы B_z (справа сверху), B_x (слева внизу) и B_y (справа внизу) компонент полного вектора магнитного поля области NOAA AR12473. Данные получены прибором HMI/SDO в 05:00 UT 27 декабря 2015 года

С использованием данных о B_x - и B_y -компонентах вектора магнитного поля исследуемой области NOAA 12473 по формуле (5) нами была вычислена структура вертикальных электрических токов. Для расчета интеграла в правой части выражения (2) использовался метод Симпсона с замкнутым контуром размерами 5×5 узлов (пикселей), что должно обеспечить низкий уровень шумов и гарантировать сохранение информации о структурах малого масштаба.

¹ <http://jsoc2.stanford.edu/ajax/lookdata.html>

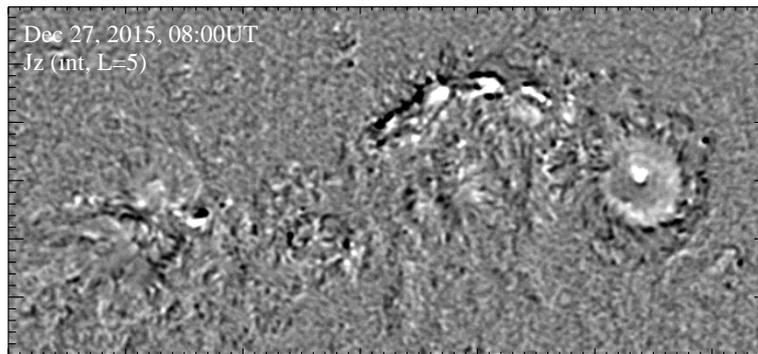


Рис. 2. Карта распределения величины плотности вертикального электрического тока в области NOAA AR12473 в 05:00 UT 27 декабря 2015 года. Расчет плотности тока произведен интегральным методом с контуром обхода в 5 узлов

Результаты вычислений представлены на рис. 2. Видно, что вертикальные электрические токи более мелкоструктурные, чем магнитное поле (см. рис. 1) – положительные и отрицательные токи перемежаются более часто, чем положительные и отрицательные магнитные поля. К тому же разбаланс электрических токов, рассчитанный по формуле

$$\rho(j_z) = \frac{\sum |j_z^+| - \sum |j_z^-|}{\sum |j_z^+| + \sum |j_z^-|} \cdot 100 \%, \quad (6)$$

оказался крайне низким и равным по абсолютной величине 0.022 %. Такой низкий разбаланс токов говорит и том, что мелкомасштабные токовые структуры, отображенные на рис. 2, являются замкнутыми достаточно низко, в низких петлях.

4 Анализ структуры магнитных полей активной области. Потенциальное и непотенциальное поле. Глобальный электрический ток

Для анализа двумерной структуры горизонтального магнитного поля нами по методу Сакураи (1982) было восстановлено потенциальное поле исследуемой АО и проведено сравнение с наблюдаемым горизонтальным магнитным полем. Поскольку наблюдаемое поле несколько отличается от потенциального, перед нами встала задача выделить из реального (наблюдаемого) магнитного поля области непотенциальную компоненту. Для этого мы провели следующие операции:

1. Наложили вектор наблюдаемого горизонтального магнитного поля на вектор потенциального магнитного поля области.
2. Выбрали оси для проекции. Ось X совпадала с направлением вектора потенциального поля, ось Y была перпендикулярна ему.
3. Спроектировали вектор наблюдаемого магнитного поля АО в двух направлениях – вдоль (потенциальная часть наблюдаемого магнитного поля) и поперек вектора потенциального поля (непотенциальная часть наблюдаемого поля АО).
4. Выделили непотенциальную компоненту наблюдаемого поля области и исследовали ее структуру.

Оказалось, что непотенциальная компонента наблюдаемого поля АО распределена не случайным образом, а образует вокруг больших пятен вихревые структуры (рис. 3, слева), особо хорошо заметные вблизи развитого лидера области. Подобная регулярная вихревая структура является признаком наличия глобального электрического тока в АО. Нами была выделена область вокруг лидера группы, где преобладала закрутка непотенциальной компоненты наблюдаемого магнитного поля в одном

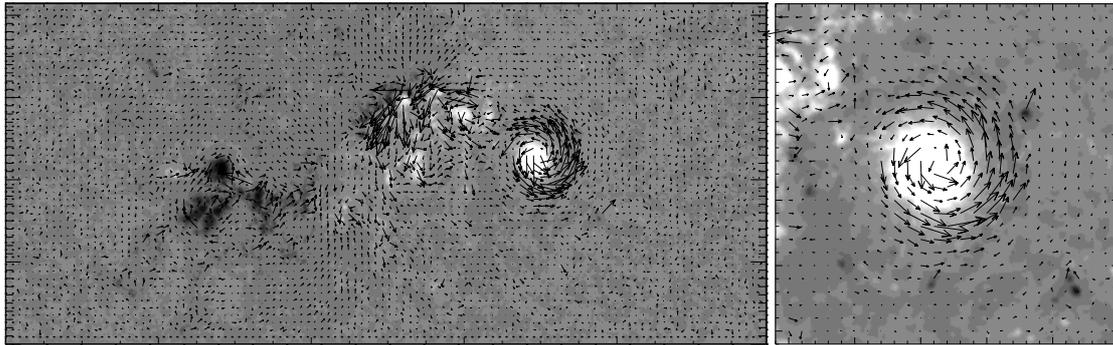


Рис. 3. Слева – магнитограмма исследуемой области с нанесенными векторами непотенциальной компоненты наблюдаемого магнитного поля АО. Справа – участок магнитограммы области NOAA AR12473 вблизи лидера группы с преобладающей регулярной закруткой непотенциальной компоненты магнитного поля против часовой стрелки, указывающей на наличие глобального электрического тока

направлении (рис. 3, справа) и сосчитан суммарный электрический ток в этой области. Этот ток оказался равным по абсолютной величине $I_{tot} = 6 \times 10^{12}$ А, а знак, полученный при расчетах, и направление закрученности магнитного поля против часовой стрелки указывают на то, что глобальный ток в лидере группы направлен вверх, на наблюдателя.

Поскольку разбаланс электрических токов в пределах АО очень низкий, то можно предположить, что выходящий в области лидера группы пятен глобальный электрический ток замыкается через хромосферу и корону на оставшейся части активной области.

5 Выводы и обсуждение

По итогам исследования структуры магнитных полей и вертикальных электрических токов области NOAA 12473 сделаны следующие выводы:

1. Карты распределения величины вертикального электрического тока показывают наличие перемежающихся мелкомасштабных токовых структур. Разбаланс вертикальных электрических токов на уровне долей процента (0.022 %) говорит о замкнутости токовых структур.
2. Выявленные вихревые структуры непотенциальной компоненты наблюдаемого магнитного поля АО являются признаком наличия глобального электрического тока, направленного вверх в лидирующей части группы пятен и замкнутого через хромосферу и корону на остальной части АО. Величина глобального тока в лидирующей части группы составляет 6×10^{12} А.

Мы считаем, что глобальный электрический ток, уходя в хромосферу и корону, может быть связан с непотенциальностью магнитного поля в верхних слоях атмосферы Солнца. Поэтому можно предположить, что он будет связан и со вспышками.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 17-02-00049 А.

Литература

- Абраменко В.И., Гопасюк С.И. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1987. Т. 76. С. 147.
 Витланд (Wheatland M.S.) // *Astrophys. J.* 2000. V. 532. P. 616.
 Сакураи (Sakurai T.) // *Solar Phys.* 1982. V. 72. Issue 2. P. 301.
 Фурсяк Ю.А., Абраменко В.И. // XXI Всероссийская ежегодная конференция по физике Солнца “Солнечная и солнечно-земная физика – 2017”. СПб: ГАО РАН. 2017. С. 353.
 Шеррер и др. (Scherrer P.H., Schou J., Bush R.I., et al.) // *Solar Phys.* 2012. V. 275. P. 207.
 Шрайвер и др. (Schrijver C.J., DeRosa M.L., Metcalf T., et al.) // *Astrophys. J.* 2008. V. 675. P. 1637.