

УДК 523.98

## Возможности оценки горизонтальных электрических токов в фотосфере 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.** Исходя из закона Ампера, нами получено выражение для оценки величины горизонтального электрического тока в активной области. Используя SDO/HMI магнитограммы  $B_z$ -компоненты магнитного поля области NOAA 11283, построены карты распределения величины горизонтального электрического тока в пределах исследуемой группы пятен. Проведена проверка полученных результатов на соответствие основным законам и принципам электромагнетизма. Показано, что магнитный поток в пятне и величина кольцевого горизонтального тока вокруг пятна (магнитной трубки) меняются в полном соответствии с законом Фарадея. Значения горизонтального тока, вычисленные по предложенной нами методике, можно в дальнейшем использовать как добавку при расчете модуля полного вектора электрического тока в фотосфере активной области.

THE POSSIBILITY OF ESTIMATING HORIZONTAL ELECTRICAL CURRENTS IN THE PHOTOSPHERE OF A SOLAR ACTIVE REGION, *by Yu.A. Fursyak, V.I. Abramenko*. On the basis of Ampere's law, we derived an expression for estimating the magnitude of horizontal electrical currents in an active region. Using SDO/HMI magnetogram of the  $B_z$ -component of the observed magnetic field for active region NOAA 11283, we calculated maps of the squared density of horizontal electrical currents within the sunspot group. The testing of our results in the framework of key laws and principles of electromagnetism was performed. The magnetic flux in the spot and the magnitude of the annular horizontal current around the spots (magnetic tubes) are shown to vary in full accordance with Faraday's law. Values of the horizontal current calculated from the proposed methodology can be used for calculations of the modulus of the electric current in the solar active region's photosphere.

**Ключевые слова:** Солнце, активные области, магнитные поля, горизонтальные электрические токи

---

### 1 Введение

Наличие электрических токов в фотосфере активной области говорит об изменениях в структуре магнитных полей, об их перестройках. Электрические токи являются признаком накопления “свободной” магнитной энергии (Шрайвер и др., 2008), которая может реализоваться в ряде вспышечных процессов различной мощности. Таким образом, изучение токовых структур в активных областях является весьма перспективным направлением, дающим возможность оценивать вероятность вспышек на Солнце. В то же время вычисление токов, особенно горизонтальных, является достаточно сложной задачей. Связано это в первую очередь с тем, что даже современные инструменты для наблюдения

Солнца не дают информации о векторе магнитного поля на разных высотах, что является необходимым условием для вычисления горизонтальных электрических токов. Для оценки горизонтальных токов приходится искать косвенные пути.

Основной задачей данной работы является получение обоснованной оценки горизонтальных электрических токов в фотосфере Солнца.

## 2 Исходные данные и математический аппарат для вычисления горизонтальных электрических токов

Исходным материалом для работы послужили магнитограммы области NOAA 11283 за период с 3 по 8 сентября 2011 года (рис. 1, слева).

Для вывода формулы, позволяющей оценить величину горизонтального электрического тока в фотосфере активной области, нами был использован закон Ампера в дифференциальной форме (Прист, 1985):

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

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

Возведя выражение (1) в квадрат и разложив его правую часть, получим:

$$\mu_0^2 \mathbf{j}^2 = (\nabla \times \mathbf{B})^2 = \left( \frac{\partial B_z}{\partial y} - \frac{\partial B_y}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial B_x}{\partial z} - \frac{\partial B_z}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial B_y}{\partial x} - \frac{\partial B_x}{\partial y} \right)^2 = \mu_0^2 j_{\perp}^2 + \mu_0^2 j_z^2, \quad (2)$$

где  $j_{\perp}^2$  и  $j_z^2$  – квадраты поперечной (горизонтальной) и вертикальной составляющих электрического тока.

Квадрат плотности горизонтального электрического тока можно представить в виде:

$$\mu_0^2 j_{\perp}^2 = \left[ \left( \frac{\partial B_z}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial B_z}{\partial y} \right)^2 \right] + \left[ \left( \frac{\partial B_y}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial B_x}{\partial z} \right)^2 - 2 \left( \frac{\partial B_z}{\partial y} \frac{\partial B_y}{\partial z} + \frac{\partial B_x}{\partial z} \frac{\partial B_z}{\partial x} \right) \right], \quad (3)$$

где величину  $E_{diss} \equiv \left( \frac{\partial B_z}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial B_z}{\partial y} \right)^2$ , называемую диссипацией магнитной энергии, можно рассчитать, исходя из данных о  $B_z$ -компоненте наблюдаемого магнитного поля активной области.

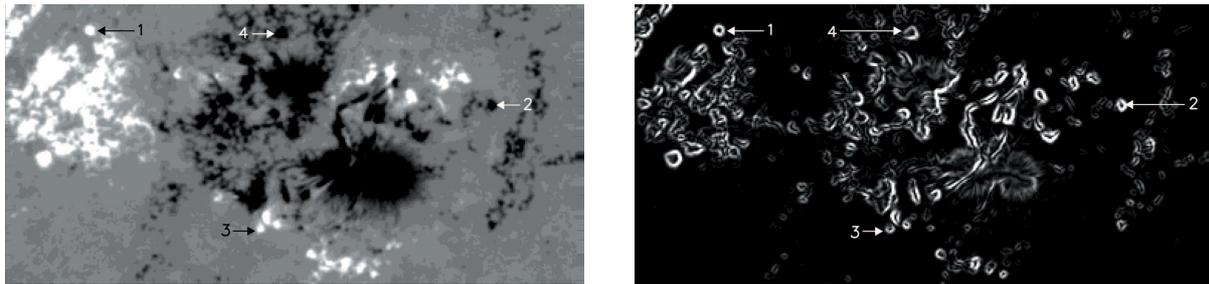
Взяв тонкий слой в фотосфере Солнца и пренебрегая величинами, связанными с производными по  $z$ , в силу невозможности их вычисления по имеющимся данным, мы переходим к формуле:

$$j_{\perp}^2 \left[ \text{А}^2 \text{ м}^{-4} \right] = \frac{1}{\mu_0^2} \cdot E_{diss} = 0.00633 \cdot E_{diss} \left[ \text{Гс}^2 \text{ км}^{-2} \right], \quad (4)$$

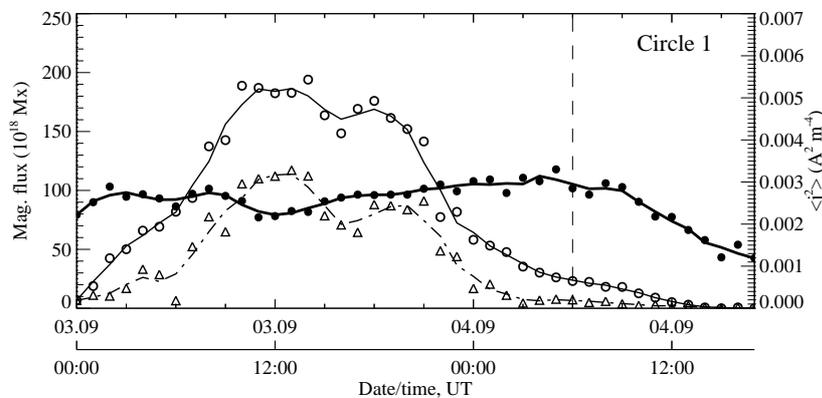
которая позволяет вычислить двумерную структуру квадрата плотности горизонтального электрического тока в фотосфере.

## 3 Полученные результаты и их проверка

Формула (4) для вычисления квадрата плотности горизонтального электрического тока получена нами при очень серьезных допущениях. И прежде чем начинать использовать полученные выражения для исследования активных областей, необходимо убедиться, что получаемые в результате расчетов данные являются физически обоснованными. Для ответа на данный вопрос мы провели эксперимент, суть которого сводится к проверке взаимного поведения во времени магнитных потоков в исследуемых пятнах и кольцевых электрических токов вокруг них. Результаты эксперимента на четырех выбранных



**Рис. 1.** Слева – магнитограмма исследуемой области NOAA 11283, полученная в 05:00UT 5 сентября 2011 года. Данные SDO/HMI. Справа – карта распределения величины диссипации магнитной энергии. Цифрами отмечены анализируемые в работе пятна с развитыми кольцевыми структурами



**Рис. 2.** Изменения со временем для пятна 1 (см. рис. 1) магнитного потока внутри контура, ограниченного уровнем индукции в 500 Гс (тонкая сплошная линия и ромбы); магнитного потока по площади, охваченной внутренней границей  $E_{diss} = 0.15 \text{ Гс}^2 \text{ км}^{-2}$  (пунктирная линия и открытые ромбы); среднего по площади кольца квадрата плотности горизонтального электрического тока (жирная линия и кружки)

пятнах (рис. 1) убедительно показали, что изменения этих величин находятся в хорошем согласии с законом электромагнитной индукции Фарадея (рис. 2).

Таким образом, было подтверждено, что проведенные нами расчеты и получаемые результаты имеют под собой физическое основание и могут быть использованы в дальнейшем для анализа динамики активных областей.

## 4 Выводы и обсуждение

Изучив взаимное поведение магнитного потока и кольцевого электрического тока в четырех пятнах/порах области NOAA 11283, мы приходим к следующим выводам:

- 1) изменения магнитного потока пятна и плотности горизонтального электрического тока в кольце вокруг пятна полностью согласуются с законом Фарадея, а значит, имеют под собой физическое основание;
- 2) полученные нами оценки величины квадрата плотности кольцевого горизонтального электрического тока  $j_{\perp}^2 = 0.002-0.004 \text{ А}^2 \text{ м}^{-4}$  находятся в соответствии со значениями плотности тока, полученными в более ранних работах (Зверева, Северный, 1970; Абраменко и др., 1991);

- 3) предложенная нами методика позволяет получить оценку плотности и структуры поперечных электрических токов и использовать эти оценки как значимую добавку при вычислении абсолютной величины полного вектора электрического тока в фотосфере активной области.

Работа выполнена при частичной поддержке грантами РФФИ 16-02-00221 А и 17-02-00049 А.

## **Литература**

- Абраменко и др. (Abramenko V.I., Gorasyuk S.I., Ogir' M.B.) // Solar Phys. 1991. V. 134. P. 287.  
Зверева А.М., Северный А.Б. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1970. Т. 41–42. С. 103.  
Прист Э.Р. // Солнечная магнитогиродинамика. М.: Мир. 1985.  
Шрайвер и др. (Schrijver C.J., DeRosa M.L., Metcalf T., et al.) // Astrophys. J. 2008. V. 675. P. 1637.