О СВЯЗИ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ГРАДИЕНТА ВЕРТИКАЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ С ГОРИЗОНТАЛЬНЫМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОКОМ НА ФОТОСФЕРЕ В МОДЕЛЬНОЙ АКТИВНОЙ ОБЛАСТИ СОЛНЦА

Нечаева А.Б.^{1,2}, Шарыкин И.Н.¹, Зимовец И.В.¹, Chen F.³

¹*Институт Космических Исследований РАН, Москва, Россия*

²*Московский Физико-Технический Институт (НИУ), Долгопрудный, Россия*

³*Nanjing University, Nanjing, China*

ABOUT THE CONNECTION OF THE HORIZONTAL GRADIENT OF THE VERTICAL MAGNETIC FIELD WITH THE HORIZONTAL ELECTRIC CURRENT ON THE PHOTOSPHERE IN THE MODEL ACTIVE REGION OF THE SUN

Nechaeva A.B.^{1,2}, Sharykin I.N.¹, Zimovets I.V.¹, Chen F.³

¹*Russian Space Research Institute, Moscow, Russia*

²*Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia*

³*Nanjing University, Nanjing, China*

Based on the data obtained by numerical simulation of the active region (AR) of the Sun using MURAM radiation magnetohydrodynamics codes, the horizontal gradient of the vertical component of the magnetic field $\nabla_h B_z$ and the horizontal component of the electric current density j_h for the AR part where the flare occurred were calculated. The calculation was made for three layers near the photosphere with 64 km vertical and 192 km horizontal steps. It was found that $\approx 90\%$ of the calculated pixels contain j_h and $\nabla_h B_z$ of the same order, but these values are poorly correlated. The correlation coefficient has been calculated for several groups of pixels, selected based on the value of the horizontal current and the magnetic field configuration. Correlation coefficients for these cases do not exceed 0.34 for the lower layer and 0.54 for the upper layer. High-value contours of j_h and $\nabla_h B_z$ were plotted and are also weakly spatially correlated. The result may indicate that one should be careful when using the horizontal magnetic field gradient as an approximation of the horizontal current in the photosphere (in particular when developing flare forecasting methods).

Additionally, probability density function $PDF(j_z/j_h)$ has been calculated in the AR, which demonstrates that in the model region the photospheric horizontal current is on average 1.4 times higher than the vertical current. This is consistent with the various estimates of the current components in real solar ARs [1] and points to the importance of further study of horizontal currents.

DOI: 10.31725/0552-5829-2020-247-250

Вступление

Одной из главных прикладных задач физики Солнца является прогнозирование солнечных вспышек, рассматриваемых как основной источник возмущений в Гелиосфере и околоземном космическом

пространстве. Считается, что основным источником энергии активных явлений в атмосфере Солнца является энергия магнитного поля. Поэтому различные численные характеристики магнитного поля [2] выступают в роли параметров, используемых для прогноза солнечной активности. Одним из таких параметров является горизонтальный градиент вертикальной компоненты фотосферного магнитного поля $\nabla_h B_z$. Наиболее успешная модель прогноза солнечных вспышек, опирающаяся на использование данного параметра, рассчитанного по магнитограммам HMI/SDO, была предложена в работе [3]. С точки зрения физики $\nabla_h B_z$ можно характеризовать как часть горизонтального электрического тока j_h [4, 5]. Однако не совсем ясно, насколько точно можно утверждать, что $\nabla_h B_z$ является приближением j_h . Целью данной работы является сравнение $\nabla_h B_z$ и j_h на уровне фотосферы с использованием данных численного трехмерного магнитогидродинамического моделирования вспышечной активной области. На базе реалистичной физической модели мы хотим понять, можно ли наблюдательные данные (векторные магнитограммы) по пространственному распределению $\nabla_h B_z$ интерпретировать с точки зрения распределения j_h (которое, в отличие от j_z , нельзя рассчитать на основе векторных магнитограмм на одном уровне).

Результаты

На основе данных о магнитном поле, полученных с помощью МГД-моделирования методом MuRAM [6], были рассчитаны горизонтальные и вертикальные токи в АО. Для расчёта применялся закон Ампера-Максвелла в дифференциальной форме:

$$\operatorname{rot} \mathbf{B} = \frac{4\pi}{c} \mathbf{j} \quad (1)$$

Для данного исследования также дополнительно отдельно был рассчитан горизонтальный градиент вертикального поля в единицах электрического тока для удобства сравнения:

$$\nabla_h B_z = \frac{c}{4\pi} \sqrt{\left(\frac{\partial B_z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial B_z}{\partial y}\right)^2} \quad (2)$$

В работах [4, 5] был предложен метод аппроксимации горизонтального тока с помощью такого градиента. Для проверки этой гипотезы, мы сравниваем величины, полученные нами из (1) и (2), беря из (1) соответственно полную горизонтальную составляющую.

Данные о магнитном поле были доступны на 4 слоях: первый слой был выбран на уровне $\tau = 1$, далее слои шли с шагом в 64 км по оси z . В результате мы получаем данные о $\mathbf{j}$ на трёх слоях. Для анализа мы взяли два слоя: самый нижний и самый верхний в части АО, где происходила вспышка.

На рис. 1 показаны контуры сильных токов j_h и сильных градиентов $\nabla_h B_z$ на панелях посередине для первого (нижний физически, верхний на

рисунке) и третьего (верхний физически, нижний на рисунке) слоев. Темно-серым цветом (контурами для градиента и цветом для тока) показан уровень в 3×10^4 статампер/см², светло-серым (только цветом для тока) – в 6×10^4 статампер/см². Как можно убедиться из рисунка, области сильного градиента слабо коррелируют с областями сильного тока. Для удобства справа также приведена магнитограмма изучаемой области и нанесена нейтральная линия (НЛ) чёрным контуром. На панелях слева показаны те же контуры для j_h разных значений и стрелками показано направление магнитного поля в плоскости рисунка.

Рис. 1.

Также мы построили двумерные гистограммы для j_h и $\nabla_h B_z$ (на рисунках обозначено как $\frac{4\pi}{c} \text{grad}_h B_z$) для четырёх категорий пикселей: 1) для пикселей с высоким значением ($j_h > 7.5 \times 10^4$ статампер/см²) горизонтального электрического тока, 2) для пикселей с высоким значением сильно наклонённого ($B > 10^3$ Гс, $\theta < 15^\circ$, где θ – угол наклона поля к горизонтали) магнитного поля, 3) для пикселей с высоким значением средне наклонённого ($B > 10^3$ Гс, $\theta < 45^\circ$) магнитного поля, и также 4) для пикселей с высоким значением горизонтального электрического тока и большого средне наклонённого магнитного поля ($B > 10^3$ Гс, $\theta < 45^\circ$ и $j_h > 7.5 \times 10^4$ статампер/см²). Эти гистограммы представлены на рис. 2 для нижнего слоя, где $\tau = 1$, и на рис. 3 для верхнего слоя. Под каждой гистограммой представлена магнитограмма изучаемой части АО, где чёрным выделены те пиксели, которые

учитывались при построении гистограмм. Также на гистограммах подписаны коэффициенты корреляции j_h и $\nabla_h B_z$ для выбранных категорий. Можно видеть, что корреляция либо отсутствует, либо слабая.

Рис. 2.

Рис. 3.

Литература

1. Fleishman G.D., Pevtsov A.A. // GSM, 2018, 235, 43.
2. Bobra M.G., Couvidat S. // Astrophys. J., 2015, 798, 135, 11pp.
3. Sadykov V.M., Kosovichev A.G. // Astrophys. J., 2017, 849, 148, 9pp.
4. Fursyak Yu.A., Abramenko V.I. // Astrophys., 2017, 60, 544.
5. Fursyak Yu.A., Abramenko V.I. // Astrophys., 2020, 63, 260.
6. Chen F. et al. // 2020 (in preparation).