

## РОЛЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ТОКОВ В ПРОЦЕССАХ СТАБИЛИЗАЦИИ СОЛНЕЧНЫХ ПЯТЕН НА КОНЕЧНЫХ СТАДИЯХ ИХ ЭВОЛЮЦИИ

**Ю.А. Фурсяк, А.А. Плотников, В.И. Абраменко**

Крымская астрофизическая обсерватория РАН, п. Научный, Крым, Россия  
yuriy\_fursyak@mail.ru

## ROLE OF ELECTRIC CURRENTS IN STABILIZATION PROCESSES OF SUNSPOTS AT FINAL STAGES OF THEIR EVOLUTION

**Yu.A. Fursyak, A.A. Plotnikov, V.I. Abramenko**

Crimean Astrophysical Observatory of RAS, Nauchny, Crimea, Russia  
yuriy\_fursyak@mail.ru

**Аннотация.** По магнитографическим данным инструмента HMI/SDO для 46 активных областей (АО), находящихся на финальной стадии эволюции, вычислены горизонтальные, вертикальные и крупномасштабные электрические токи. Параметры электрического тока сопоставлены со скоростью затухания магнитного потока пятна. Статистический анализ показывает следующее: 1) более высокие значения локальных вертикальных электрических токов являются индикатором более высоких темпов потери магнитного потока пятна; 2) стабилизирующее воздействие на пятно оказывают крупномасштабный электрический ток, а также индукционная составляющая горизонтального электрического тока в кольцевой структуре вокруг пятна, обусловленная изменением во времени его магнитного потока.

**Ключевые слова:** Солнце, активные области, устойчивость солнечных пятен, электрические токи.

**Abstract.** Using the magnetographic data of the HMI/SDO instrument, we calculated the horizontal, vertical and large-scale electric currents for 46 active regions (AR) at the final stage of their evolution. Parameters of the electric current were compared with the decay rate of the magnetic flux of the sunspot. Statistical analysis showed the following: 1) higher values of local vertical electric currents are an indicator of higher speed of loss of the magnetic flux of the sunspot; 2) stabilizing effect on the sunspot is made by a large-scale electric current and by an induction component of the horizontal electric current in the annular structure around the sunspot, determined by variation in its magnetic flux with time.

**Keywords:** Sun, active regions, sunspot stability, electric currents.

### ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на десятилетия исследований, в настоящее время остаются нерешенные вопросы, касающиеся стабильности солнечных пятен. Исследователи не имеют однозначного ответа, почему одни пятна могут распасться за несколько дней, а другие существуют на протяжении нескольких оборотов Солнца.

Одним из основных механизмов разрушения солнечных пятен является турбулентная диффузия магнитного поля [Solov'ev, 1976a; Kubo et al., 2008; Litvinenko, Wheatland, 2015]. Способствовать разрушению пятна могут также супергрануляционные движения [Simon, Leighton, 1964], турбулентные движения в масштабе гранул [Petrovay, Moreno-Insertis, 1997], мелкомасштабные движущиеся магнитные элементы [Harvey, Harvey, 1973]. Определенную роль в процессах стабилизации/дестабилизации солнечных пятен могут играть и параметры самого пятна, глубина залегания оснований пятна в конвективной зоне [Strecker et al., 2021], а также различного рода колебания в пятнах [Solov'ev, 1984; Solov'ev, Kiričhek, 2014].

Ряд исследователей полагает, что электрические токи также могут оказывать влияние на темпы диссипации магнитного потока пятна [Solov'ev, 1976b; Maytllis, Strauss, 1993]. Существует много теоретических работ в данном направлении, однако статистических исследований, по сути, нет. Здесь мы пытаемся восполнить этот пробел, и на выборке из 46 активных областей (АО), находящихся на финальных стадиях эволюции, анализируем роль электриче-

ских токов в процессах стабилизации/дестабилизации солнечных пятен.

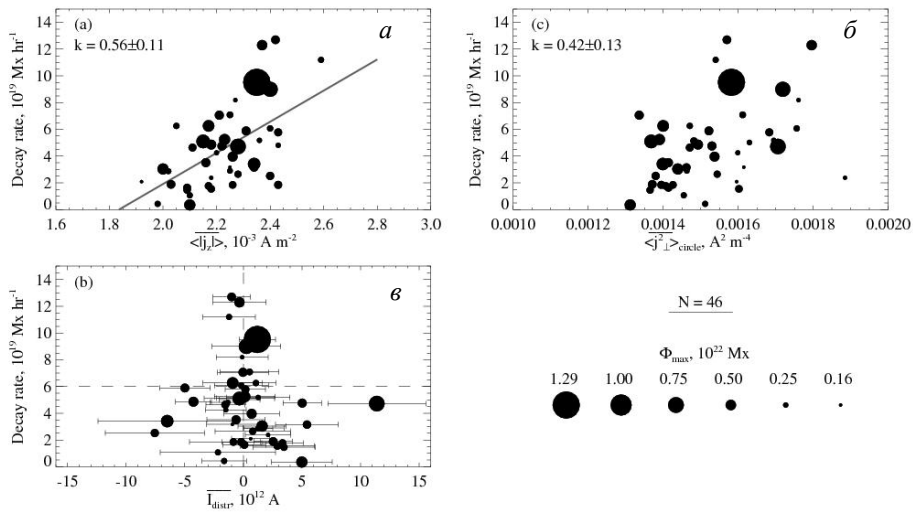
### ДАнные НАБЛЮДЕНИЙ И ПРИМЕНЯЕМЫЕ МЕТОДЫ

Работа выполнена с использованием данных инструмента HMI/SDO [Scherrer et al., 2012], доступных по адресу [<http://jsoc2.stanford.edu/ajax/lookdata.html>]. Для вычисления максимальных значений магнитного потока и скорости затухания магнитного потока пятен использованы полнодисковые магнитограммы лучевой компоненты вектора магнитного поля в фотосфере. Для вычисления параметров электрического тока использованы SHARP (Spaceweather HMI Active Region Patch) [Bobra et al., 2014] магнитограммы распределения компонент вектора магнитного поля (цилиндрические координаты, серия данных SEA\_720s). Временное разрешение исходных данных — 12 мин.

Для анализа были отобраны 46 АО согласно следующим критериям:

1. Область должна находиться на финальной стадии эволюции. Обязательным условием является наличие хорошо развитого основного пятна, присутствие мелких пор допускается (в том числе и противоположной развитому пятну полярности).

2. Область должна быть изолирована от других АО (т. е. в пределах соответствующей SHARP-магнитограммы должна находиться только одна область с уникальным NOAA-идентификатором). Соответствие данным критериям для областей анализируемой выборки было реализовано с помощью визуального контроля.



Графики зависимости между усредненными за время мониторинга величинами средней беззнаковой плотности вертикального электрического тока (*a*), крупномасштабного электрического тока (*б*), квадрата плотности горизонтального электрического тока в кольцевой структуре вокруг пятна (*в*) и скоростью затухания магнитного потока пятна для всех АО анализируемой выборки ( $N=46$ ). Размеры кружочков пропорциональны максимальной величине магнитного потока пятна

Минимизация возможных ошибок при вычислении параметров электрического тока, обусловленных эффектом проекции и вкладом пикселей с неправильно разрешенной  $\pi$ -неопределенностью направления азимута поперечного поля, реализована применением специальных масок и мониторингом АО только за время ее нахождения в пределах  $\pm 35^\circ$  от центрального меридиана (4–6 сут).

Скорость затухания магнитного потока в пятне была определена как тангенс угла наклона линии регрессии на фазе распада солнечного пятна [Plotnikov et al., 2022]. Параметры электрических токов в исследуемых областях вычислены с применением ранее описанных методик: метода оценки квадрата плотности горизонтального тока [Fursyak, Abramenko, 2017], интегрального метода вычисления вертикального тока [Fursyak, 2018], метода обнаружения крупномасштабного тока [Fursyak et al., 2020].

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Основные результаты сопоставления параметров электрических токов для АО анализируемой выборки следующие (см. рисунок):

1. Зависимость между усредненной по времени величиной средней беззнаковой плотности вертикального электрического тока в АО и скоростью затухания магнитного потока пятна линейная с коэффициентом корреляции  $k=0.56$  (панель *a*). Более высокие значения средней беззнаковой плотности вертикального тока в областях с высокой скоростью затухания магнитного потока, вероятно, обусловлены наличием большого количества движущихся мелкомасштабных магнитных элементов, которые уносят значительную часть магнитного потока пятна [Martinez Pillet, 2002; Kubo et al., 2007].

2. Зависимость между величиной крупномасштабного электрического тока и скоростью затухания магнитного потока (панель *б*) показывает следующее: 1) в большинстве АО анализируемой вы-

борки крупномасштабный ток отсутствует; 2) ненулевой крупномасштабный ток (в пределах ошибок вычислений, указанных на графике барами) характерен для областей со скоростью затухания магнитного потока в пятне не выше  $6 \times 10^{19}$  Мкс  $\text{ч}^{-1}$  и имеет величину порядка  $10^{12}$  А. Ненулевой крупномасштабный ток зафиксирован в 13 АО со скоростью затухания магнитного потока ниже  $6.0 \times 10^{19}$  Мкс  $\text{ч}^{-1}$  из 35, что составляет 37 % случаев. Таким образом, крупномасштабный электрический ток может быть одним из механизмов стабилизации пятна, однако не единственным.

3. Зависимость между усредненной по времени средней величиной квадрата плотности горизонтального электрического тока в кольцевой структуре вокруг пятна и скоростью затухания его магнитного потока линейная с коэффициентом корреляции  $k=0.42$  (панель *в*). Мы полагаем, что результирующий горизонтальный ток в данном случае имеет два слагаемых, первое из которых является функцией градиента давления [Пикельнер, 1966] и зависит от параметров пятна, второе — индукционная составляющая, которая зависит от скорости затухания магнитного потока пятна. Вторая компонента описывается законом Фарадея и оказывает влияние на стабильность пятна.

## ВЫВОДЫ

Проведенный на выборке из 46 АО, находящихся на финальной стадии эволюции, статистический анализ показывает следующее:

1. Локальные вертикальные электрические токи не оказывают непосредственного влияния на процессы стабилизации/дестабилизации солнечных пятен, однако их более высокие значения являются индикатором более высоких темпов потери магнитного потока пятна.

2. Стабилизирующее воздействие на пятно оказывают крупномасштабный электрический ток, а также

индукционная составляющая горизонтального электрического тока в кольцевой структуре вокруг пятна, обусловленная изменением во времени его магнитного потока.

Работа выполнена при поддержке грантом РФФ № 18-12-00131.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Пикельнер С.Б. *Основы космической электродинамики*. М.: Наука, 1966. 408 с.

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. Vol. 289. P. 3549–3578.

Fursyak Yu.A. Vertical electric currents in active region: calculation methods and relation to the flare index. *Geomagnetism and Aeronomy.* 2018. Vol. 58, iss. 8. P. 1129–1135.

Fursyak Yu.A., Abramenko V.I. Possibilities for estimating horizontal electrical currents in active regions on the Sun. *Astrophysics.* 2017. Vol. 60, iss. 4. P. 544–52.

Fursyak Yu.A., Kutsenko A.S., Abramenko V.I. Distributed electric currents in solar active regions. *Solar Phys.* 2020. Vol. 295, article id. 19. 17 p.

Harvey K., Harvey J. Observations of moving magnetic features near sunspots. *Solar Phys.* 1973. Vol. 28. P. 61–71.

Kubo M., Lites B.W., Shimizu T., Ichimoto K. Magnetic flux loss and flux transport in a decaying active region. *Astrophys. J.* 2008. Vol. 686. P. 1447–1453.

Kubo M., Shimizu T., Tsuneta, S. Vector magnetic fields of moving magnetic features and flux removal from a sunspot. *Astrophys. J.* 2007. Vol. 659, iss. 1. P. 812–828.

Litvinenko Yu.E., Wheatland M.S. Modeling sunspot and starspot decay by turbulent erosion. *Astrophys. J.* 2015. Vol. 800, article id. 130. 7 p.

Martínez Pillet V. Decay of sunspots. *Astron. Nachr.* 2002. Vol. 323. P. 342–348.

Maytlis V.P., Strauss H.R. Current convection in solar active regions. *Solar Phys.* 1993. Vol. 145. P. 111–118.

Petrovay K., Moreno-Insertis F. Turbulent Erosion of Magnetic Flux Tubes. *Astrophys. J.* 1997. Vol. 485. P. 398–408.

Plotnikov A.A., Abramenko V.I., Kutsenko A.S. Statistical analysis of the total magnetic flux decay rate in solar active regions. *Mont. Not. Royal Astron. Soc.* 2022 (in print).

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. Vol. 275. P. 229–259.

Simon G.W., Leighton R.B. Velocity fields in the solar atmosphere. III. Large-scale motions, the chromospheric network, and magnetic fields. *Astrophys. J.* 1964. Vol. 140. P. 1120–1149.

Solov'ev A.A. Torsional oscillations of sunspots. *Byulletin Solnechnye Dannye Akademii Nauk USSR.* 1984. No. 1. P. 73–78.

Solov'ev A.A. On the problem of sunspot decay. *Byulletin Solnechnye Dannye Akademii Nauk USSR.* 1976(a). No. 7. P. 73–78.

Solov'ev A.A. Ohmic dissipation of sunspots. *Soviet Astronomy.* 1976(b). Vol. 20. P. 75–78.

Solov'ev A., Kirichek E. Basic properties of sunspots: equilibrium, stability and long-term eigen oscillations. *Astrophys Space Sci.* 2014. Vol. 352. P. 23–42.

Strecker H., Schmidt W., Schlichenmaier R., Rempel M. On the (in) stability of sunspots. *Astron. Astrophys.* 2021. Vol. 649, id. A123. 15 p.

URL: <http://jsoc2.stanford.edu/ajax/lookdata.html> (дата обращения 23 января 2022 г.).