

СРАВНЕНИЕ ФУНКЦИЙ ПЛОТНОСТИ ВЕРОЯТНОСТИ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА В АКТИВНЫХ ОБЛАСТЯХ СОЛНЦА ПО ДАННЫМ ИНСТРУМЕНТОВ HMI/SDO И SOT/Hinode

COMPARISON BETWEEN PROBABILITY DENSITY FUNCTIONS OF VERTICAL ELECTRIC CURRENT IN SOLAR ACTIVE REGIONS BASED ON HMI/SDO AND SOT/Hinode DATA

А.Б. Нечаева 

Институт космических исследований РАН,
Москва, Россия, nechaeva.ab@phystech.edu

И.В. Зимовец 

Институт космических исследований РАН,
Москва, Россия, ivanzimovets@gmail.com

И.Н. Шарыкин 

Институт космических исследований РАН,
Москва, Россия, ivan.sharykin@phystech.edu

A.B. Nechaeva

Space Research Institute RAS,
Moscow, Russia, nechaeva.ab@phystech.edu

I.V. Zimovets

Space Research Institute RAS,
Moscow, Russia, ivanzimovets@gmail.com

I.N. Sharykin

Space Research Institute RAS,
Moscow, Russia, ivan.sharykin@phystech.edu

Аннотация. Исследование электрических токов в активных областях (АО) Солнца является важным шагом к пониманию солнечной активности и, в частности, солнечных вспышек. В работе проводится сравнительный анализ функций плотности вероятности (Probability Density Function) вертикального электрического тока $PDF(|j_z|)$ в нескольких активных областях, рассчитанных на основе данных HMI/SDO и SOT/Hinode о магнитном поле на фотосфере. Установлено, что в тех частях АО, которые содержат токовые структуры с плотностью тока выше шума ($|j_z| > 9 \cdot 10^3$ статампер/см²), эти функции примерно совпадают. Основное различие возникает для малых (шумовых) значений $|j_z| \lesssim 9 \cdot 10^3$ статампер/см² из-за разной чувствительности рассматриваемых приборов. Было определено также, что критерий отбора пикселей по величине магнитного поля, как предполагалось ранее, неприменим, и схожесть функций определяется именно пикселями с высокими значениями j_z . Для всех рассматриваемых $PDF(|j_z|)$ были вычислены показатели степени хвоста функций по данным двух инструментов, которые совпадают в пределах своих погрешностей для токовых структур со значениями больше шумового. Таким образом, нет существенной разницы в том, данные какого прибора рассматривать при анализе функций плотности вероятности токов в областях сильных токов, какими как раз являются те участки АО, где локализованы вспышки.

Ключевые слова: солнечные активные области, магнитные поля, электрические токи, солнечные вспышки.

Abstract. Studying electric currents in solar active regions (AR) is an essential step in understanding solar activity in general and solar flares in particular. In this paper, we compare probability density functions of vertical electric current $PDF(|j_z|)$ in several active regions, using HMI/SDO and SOT/Hinode photospheric magnetic field data. We have established that in the AR parts which contain current structures with current density above the noise level ($|j_z| > 9 \cdot 10^3$ statampere/cm²) these functions are nearly identical. The main difference in $PDFs$ for low (noise) $j_z \lesssim 9 \cdot 10^3$ statampere/cm² is due to differences in sensitivity of these two instruments. We have also found that the criterion of pixel selection from magnetic field strength is inapplicable, and the similarity between $PDFs$ is determined by high j_z . For all $PDF(|j_z|)$ under study we have calculated the power law exponent of the PDF tail for the two instruments, which coincide within their errors for the current structures with current values above noise level. Thus there is no significant difference as to which instrument is used for analyzing probability density functions in high current parts of ARs where flares are localized.

Keywords: solar active regions, magnetic field, electric currents, solar flares.

ВВЕДЕНИЕ

При исследовании динамических процессов в активных областях (АО) Солнца, в том числе их вспышечной продуктивности, обычно рассматривают

магнитное поле, поскольку считается, что оно является основным источником энергии. Однако АО можно рассматривать также в терминах электрического тока, потому что токи связаны со свободной

энергией магнитного поля. Электрический ток можно получить из данных о магнитном поле с применением закона Ампера—Максвелла в дифференциальном

$$\text{rot}H = \frac{4\pi}{c} j \tag{1}$$

или интегральном виде

$$\oint_l Hdl = \frac{4\pi}{c} I. \tag{2}$$

В данный момент магнитное поле рутинно измеряется на уровне фотосферы. Однако векторные магнитограммы в настоящее время доступны только для одного узкого (~100 км) слоя, поэтому изучение токов в основном ограничивается вертикальной их составляющей. Заметим, что попытки оценки горизонтальной составляющей электрического тока также имеют место [Северный, 1988; Puschmann et al., 2010; Fursyak, Abramenko, 2017; Nechaeva et al., 2021].

В ряде работ исследовалась связь электрического тока со вспышечной продуктивностью АО (например, [Северный, 1988; Абраменко и др., 1990; Kontogiannis et al., 2017; Fursyak, 2018]). В статье [Zimovets et al., 2020a] исследовались форма функции плотности вероятности (Probability Density Function) вертикального электрического тока $PDF(|j_z|)$, ее изменение в результате вспышки в рассматриваемой АО и связь с некоторыми параметрами АО. Для ограниченной выборки (48 событий в 33 АО), определенной ранее в работе [Zimovets et al., 2020b], явных изменений формы $PDF(|j_z|)$ до и после вспышки найти не удалось, как и связи параметров функции с магнитным классом рассматриваемой АО. Исследование [Zimovets et al., 2020b] было выполнено с использованием векторных магнитограмм инструмента Helioseismic and Magnetic Imager на борту Solar Dynamics Observatory (HMI/SDO) [Scherrer et al., 2012; Hoeksema et al., 2014]. Целью этой работы является сравнение функций плотности вероятности $PDF(|j_z|)$, полученных по данным двух инструментов — HMI/SDO и Solar Optical Telescope на борту космического аппарата Hinode (SOT/Hinode) [Tsuneta et al., 2008]. В частности, мы хотим проверить, имеет ли $PDF(|j_z|)$, построенная по данным SOT/Hinode, такой же вид, какой был получен по данным HMI/SDO, а именно гауссов «колокол» для низких значений $|j_z|$ и степенной хвост для высоких. Отметим, что сравнение токов по данным этих двух приборов ранее было проделано в статье [Fursyak, 2018], однако в той работе не были изучены функции плотности вероятности вертикального электрического тока и условия, при которых они совпадают. Влияние пространственного разрешения инструмента на измеряемые токи на Солнце ранее обсуждалось в работе [Barnes, Leka, 2018].

АНАЛИЗ ДАННЫХ И РЕЗУЛЬТАТЫ

На основе векторных магнитограмм для семи АО, в которых происходили вспышки различной мощности (классы вспышек от C 1.0 до X 2.2), были построены карты вертикального электрического тока по данным приборов HMI/SDO и SOT/Hinode. Данные о магнитном поле были взяты максимально близко по времени к вспышке, однако в некоторых случаях время между снятием магнитограммы и началом вспышки достигало часа из-за того, что SOT/Hinode имеет большой шаг по времени между циклами снятия данных. В одной АО (NOAA 11675) была взята магнитограмма, полученная через сутки после вспышки класса C1.0. Отбор АО для анализа проводился на основе каталога Hinode Flare Catalogue [Watanabe et al., 2012]. Список используемых для данного анализа АО и рассматриваемых вспышек приведен в табл. 1. Вспышка в АО 11675 не внесена в таблицу, поскольку она сильно опережает по времени используемые магнитограммы и связь вычисляемых токов с этой вспышкой неочевидна.

Таблица 1

Активные области и вспышки, в окрестности которых (по времени) проводился анализ

Номер активной области NOAA	Идентификатор вспышки	Рентгеновский класс вспышки
12790	SOL2020-12-03T09:55	C1.2
12673	SOL2017-09-06T08:57	X2.2
12665	SOL2017-07-14T01:07	M2.4
12297	SOL2015-03-11T22:08	C7.8
12080	SOL2014-06-10T06:19	C2.4
11675	—	—
11158	SOL2011-02-15T10:02	C1.0

Построение карт вертикального электрического тока j_z происходило по следующему алгоритму: во-первых, поскольку данные о магнитном поле двух рассматриваемых приборов различаются размером пиксела, магнитограммы SOT/Hinode (с разрешением 0.3 угл. сек.) были закруглены до разрешения магнитограмм HMI/SDO (1 угл. сек.). Во-вторых, магнитограммы были попиксельно совмещены друг с другом по данным белого света, поскольку координаты центра магнитограммы SOT/Hinode не всегда корректны. Заметим, что магнитограммы SOT/Hinode покрывают только часть диска, в отличие от магнитограмм HMI/SDO, который наблюдает весь солнечный диск. После этого по формуле Ампера—Максвелла (1) происходил пересчет магнитограмм в карты вертикального электрического тока j_z . Для сравнения делались расчеты на основе интегральной формулы (2). Далее для каждой АО были построены и проанализированы функции плотности вероятности вертикального тока $PDF(|j_z|)$.

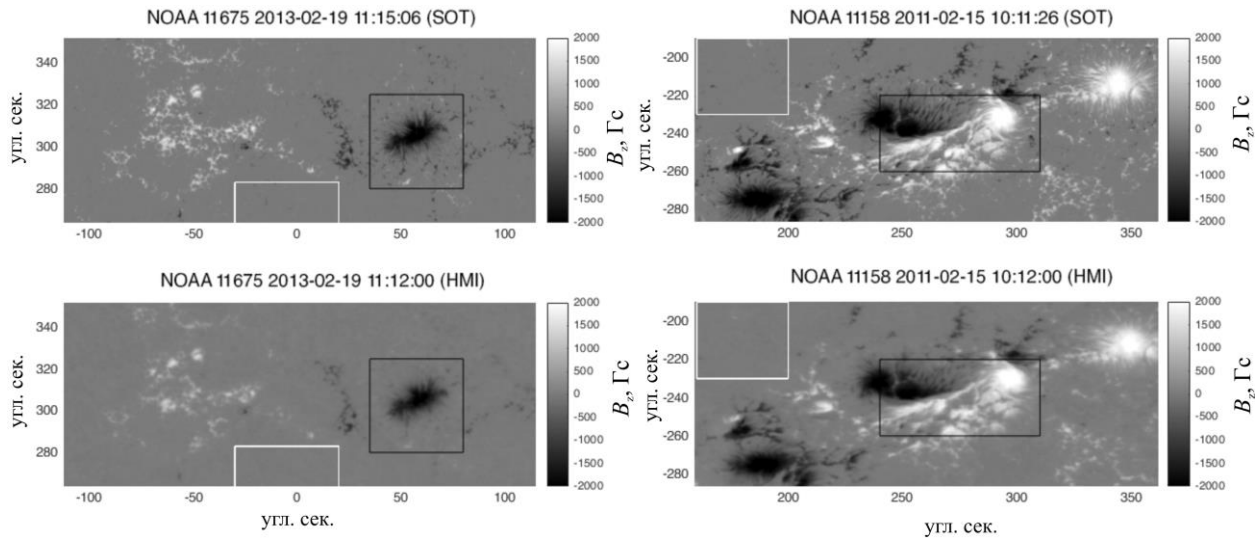


Рис. 1. Магнитограммы вертикальной компоненты магнитного поля B_z на фотосфере для активных областей NOAA 11675 (слева) и NOAA 11158 (справа) по данным SOT/Hinode (верхние панели) и HMI/SDO (нижние панели). Черными и белыми прямоугольниками обозначены участки АО, используемые для построения рисунков на верхних и нижних панелях рис. 3 соответственно

Процедура построения таких функций описана в статье [Zimovets et al., 2020a] с тем отличием, что была использована нестандартная нормировка. В представленной работе используется более стандартная нормировка, а именно: значение в каждом бине гистограммы значений $|j_z|$ равно количеству пикселей в рассматриваемой области со значениями в данном бине (интервале), поделенному на общее количество пикселей в рассматриваемой области и на ширину бина. Это соответствует оценке вероятности того, что случайная величина (плотность вертикального тока) в данной выборке будет иметь значение в заданном интервале (бине) значений.

Для удобства на рис. 1 приведены магнитограммы двух областей, которые используются для иллюстрации результатов: NOAA 11675 и NOAA 11158. Получившиеся карты вертикального тока представлены на рис. 2. Слева показана АО NOAA 11675, справа — NOAA 11158. На верхних панелях показаны карты плотности вертикального электрического тока по данным SOT/Hinode, на средних — по данным HMI/SDO, цветовая шкала представлена в единицах $|j_z|$ системы СГС, т. е. статампер/см². На нижних панелях приведены плотности вероятности вертикального электрического тока $PDF(|j_z|)$ в логлогмасштабе (натуральный логарифм). Темно-серым цветом показаны плотности вероятности по данным SOT/Hinode, светло-серым — по данным HMI/SDO. Разными маркерами обозначены плотности вероятности, полученные в результате вычисления $|j_z|$ по формулам Ампера—Максвелла в интегральной и дифференциальной формах. Можно видеть, что эти плотности вероятности совпадают, поэтому нет принципиальной разницы, каким способом рассчитывать ток — интегральным или дифференциальным. Видно также, что для всей АО $PDF(|j_z|)$ немного различаются по форме в области

$|j_z| < 9 \cdot 10^3$ статампер/см², которую мы называем шумовой (см. [Zimovets et al., 2020a]). Это можно объяснить различиями фоновых токов из-за разной чувствительности приборов. На рис. 3 показаны $PDF(|j_z|)$ для различных участков АО (отмеченных на рис. 1 и 2 черными и белыми прямоугольниками соответственно): для участка, где концентрируются сильные токи (верхняя панель), и для «фоновой» участка АО, где присутствуют в основном только шумовые токи (нижняя панель). Левые панели соответствуют АО NOAA 11675, правые — NOAA 11158. Из распределений для шумового тока можно видеть, что основное различие в общих $PDF(|j_z|)$ для всей АО вносят именно они. Отметим, что шумовые токи располагаются в области значений до $|j_z| \sim 9 \cdot 10^3$ статампер/см², тогда как интересующие нас степенные хвосты находятся выше этого значения. Причем для NOAA 11158 это различие изначально меньше из-за того, что в этой области больше пикселей с высокими значениями тока $|j_z|$ (см. рис. 2).

Для более формального описания схожести распределений в участках АО с сильными токами мы аппроксимировали хвосты распределений степенной функцией $y = ax^b$ и сравнили показатели степени полученных распределений для двух рассматриваемых приборов. Результаты аппроксимации с погрешностями представлены в табл. 2. Можно видеть, что приборы SOT/Hinode и HMI/SDO в пределах погрешностей дают одинаковые результаты в тех частях АО, где концентрируются сильные токи.

Дополнительно была проверена гипотеза, возможно ли определить пороговое значение B_{hor}^* горизонтального магнитного поля такое, что все пиксели АО, содержащие поле $B_{hor} > B_{hor}^*$, давали бы совпадающие распределения для двух инструментов (рассматривается именно горизонтальная составляющая магнитного поля, поскольку она определяет

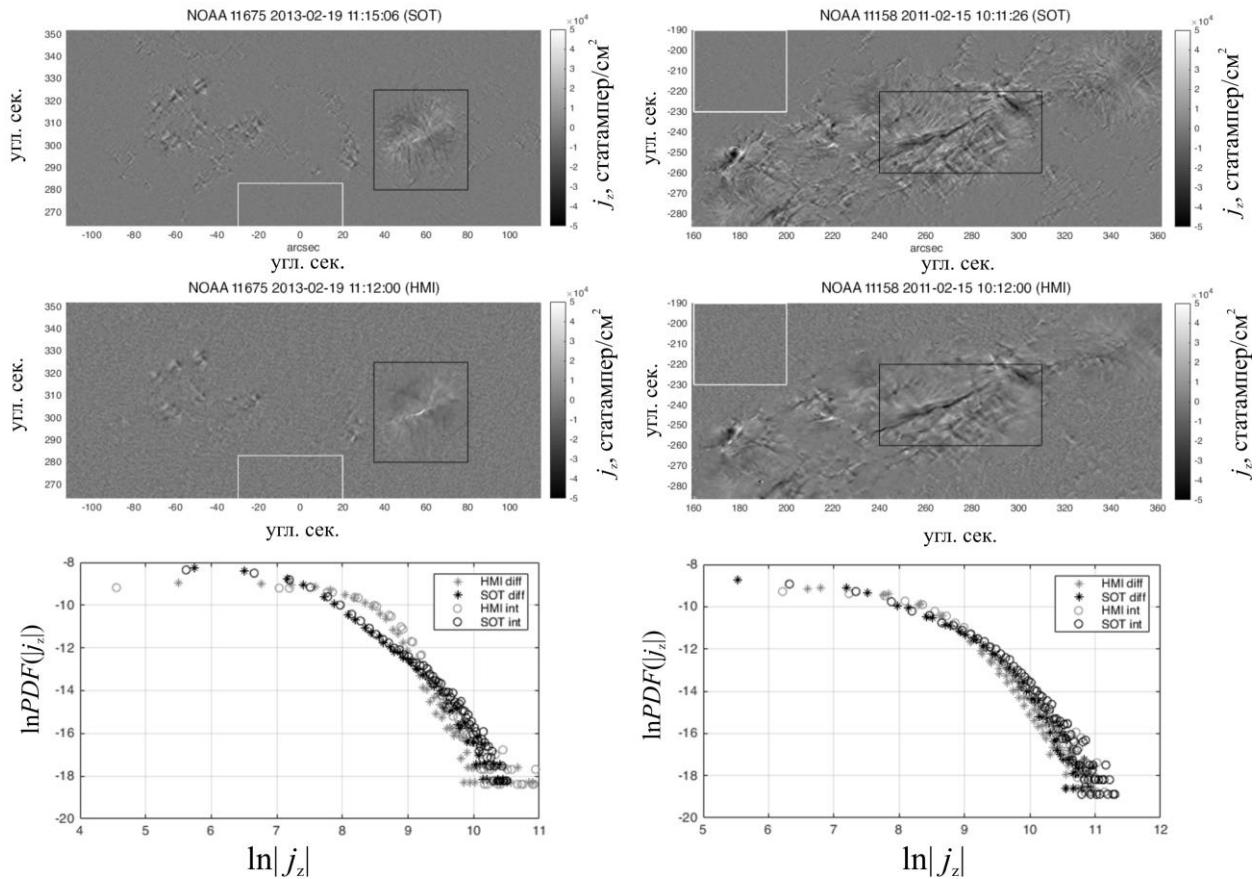


Рис. 2. Карты плотности вертикального электрического тока по данным SOT/Hinode (верхние панели) и HMI/SDO (средние панели), а также функции плотности вероятности $PDF(|j_z|)$ (нижние панели) для NOAA 11675 (слева) и NOAA 11158 (справа). Черные и белые прямоугольники на верхних и средних панелях отмечают участки АО, используемые для построения рисунков на верхней и нижней панелях рис. 3 соответственно. На нижней панели звездочками и кружками показаны плотности вероятности, полученные в результате применения к магнитограммам HMI/SDO (серые значки) и SOT/Hinode (черные значки) соответственно дифференциальной и интегральной формы закона Ампера—Максвелла

Таблица 2

Показатели степени (с погрешностями) хвостов $PDF(|j_z|)$, полученные линейной аппроксимацией (в логлог-масштабе) для всех рассматриваемых АО

Номер активной области NOAA	Показатель степени хвоста распределения по SOT/Hinode	Показатель степени хвоста распределения по HMI/SDO
12790	-3.35 ± 0.23	-3.55 ± 0.52
12673	-2.51 ± 0.23	-2.79 ± 0.29
12665	-4.02 ± 0.29	-3.98 ± 0.32
12297	-3.32 ± 0.32	-3.02 ± 0.24
12080	-3.52 ± 0.25	-3.49 ± 0.42
11675	-3.56 ± 0.62	-3.29 ± 0.40
11158	-3.13 ± 0.33	-3.10 ± 0.32

вертикальный ток согласно формулам (1) и (2). Для этого были построены графики зависимости нормированного на количество точек распределения суммы квадратов остатков регрессии (RSS) от вели-

чины горизонтального магнитного поля отсечки. Эти зависимости показаны на рис. 4. Как видно из графиков для трех из рассмотренных областей, нельзя точно определить универсальное пороговое значение

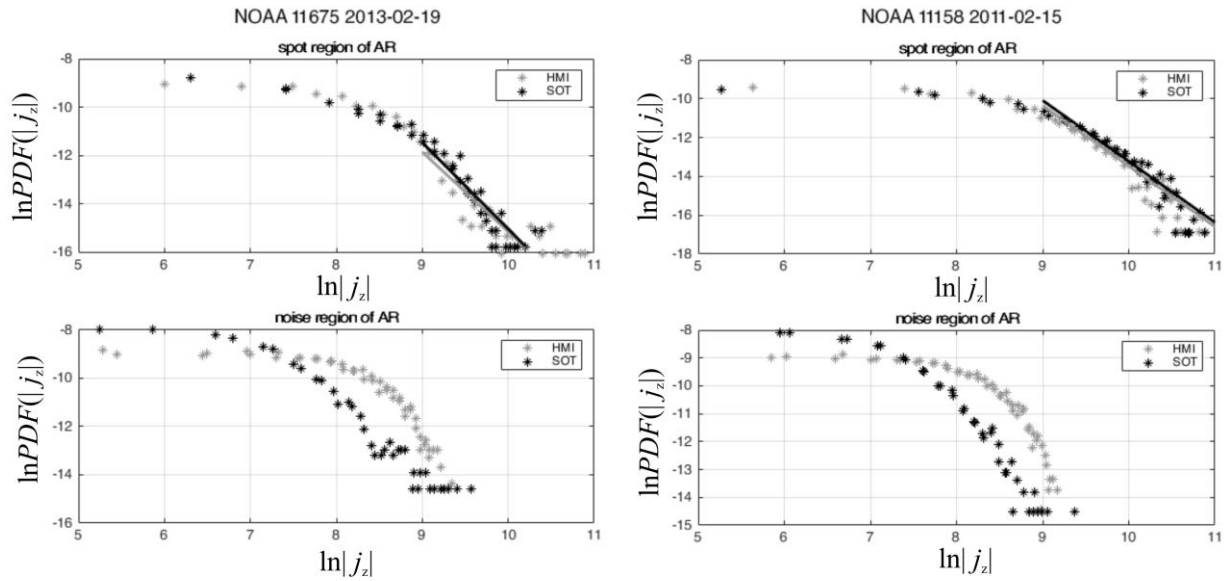


Рис. 3. $PDF(|j_z|)$ для отдельных участков NOAA 11675 (левые панели) и NOAA 11158 (правые панели), рассчитанные по данным HMI/SDO (серые звездочки) и SOT/Hinode (черные звездочки): верхняя панель — для части АО с сильными токами (черный прямоугольник на рис. 2), прямые — аппроксимации степенного хвоста распределений; нижняя панель — для фоновой части АО (белый прямоугольник на рис. 2)

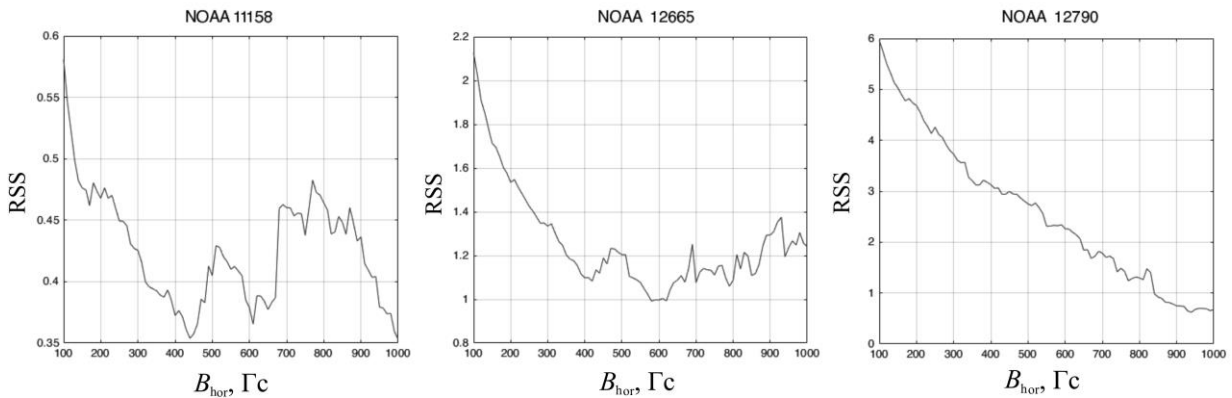


Рис. 4. Зависимость нормированной на количество точек распределения суммы квадратов остатков регрессии (RSS) от абсолютной величины горизонтального магнитного поля отсечки для трех АО: NOAA 11158 (левая панель), NOAA 12665 (средняя панель) и NOAA 12790 (правая панель)

B_{hor}^* , при котором существует минимум RSS или значение RSS выходит на плато.

ВЫВОДЫ

В результате анализа семи вспышечных АО установлено, что форма функций плотности вероятности вертикального электрического тока универсальна для инструментов SOT/Hinode и HMI/SDO: для низких (фоновых) значений $|j_z|$ плотность вероятности представляет собой гауссов «колокол», а для высоких — степенной хвост. В фоновой части АО различие $PDF(|j_z|)$ может объясняться разной чувствительностью и пространственным разрешением приборов, а для тех частей, где концентрируются токи больших амплитуд, плотности вероятности хорошо повторяют друг друга. Для дальнейшего анализа нас интересуют только степенные хвосты, показатели степени которых совпадают в пределах

погрешности для данных двух рассматриваемых инструментов. Различие в форме плотностей вероятности тока может возникать также из-за того, что в этих двух инструментах используются разные спектральные линии для построения магнитограмм: в HMI/SDO — 617.3 нм, а в SOT/Hinode — 630.2 нм. Характерные высоты формирования этих линий в классической атмосфере оцениваются соответственно как 270 км для HMI/SDO и 340 км и 260 км для SOT/Hinode [Löhner-Böttcher et al., 2019], поскольку во втором случае имеются две магниточувствительные линии с разными факторами Ланде. Однако маловероятно, что при таком малом различии в высотах (в несколько раз меньше размеров пикселей магнитограмм) будет наблюдаться значительное различие в характеристиках вертикальных электрических токов. Можно заключить, что при использовании данных менее чувствительного прибора HMI/SDO для анализа электрических токов в тех частях АО, где концентрируются сильные токи, мы

не теряем информацию по сравнению с данными более чувствительного SOT/Hinode. Причем отбор пикселей для анализа стоит проводить именно по величине $|j_z|$, а не магнитного поля.

В дальнейшем планируется провести более детальный статистический анализ $PDF(|j_z|)$ для большой выборки локальных участков вспышечных АО по данным HMI/SDO, которые накоплены почти для всего 24-го цикла солнечной активности с шагом 720 с для всего диска Солнца, в отличие от данных SOT/Hinode.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 17-72-20134).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Абраменко В.И., Гопасюк С.И., Огирь М.Б. Выявление разновидностей вспышек на основе исследования электрических токов. *Известия КРАО*. 1990. Т. 81. С. 8–13.

Северный А.Б. *Некоторые проблемы физики Солнца*. М.: Наука, 1988. 224 с.

Barnes G., Leka K.D. Inferring currents from the Zeeman effect at the solar surface. *Electric Currents in Geospace and Beyond*. 2018. P. 81–91. (Geophys. Mon. Ser., vol. 235). DOI: [10.1002/9781119324522.ch5](https://doi.org/10.1002/9781119324522.ch5).

Fursyak Y.A. Vertical electric currents in active regions: calculation methods and relation to the flare index. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2018. Vol. 58. P. 1129–1135. DOI: [10.1134/S0016793218080078](https://doi.org/10.1134/S0016793218080078).

Fursyak Y.A., Abramenko V.I. Possibilities for estimating horizontal electrical currents in active regions on the Sun. *Astrophys. J.* 2017. Vol. 60. P. 544–552. DOI: [10.1007/s10511-017-9505-6](https://doi.org/10.1007/s10511-017-9505-6).

Hoeksema J.T., Liu Y., Hayashi K., et al. The Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) vector magnetic field pipeline: Overview and performance. *Solar Phys.* 2014. Vol. 289. P. 3483–3530. DOI: [10.1007/s11207-014-0516-8](https://doi.org/10.1007/s11207-014-0516-8).

Kontogiannis I., Georgoulis M.K., Park S.H., Guerra J.A. Non-neutralized electric currents in solar active regions and flare productivity. *Solar Phys.* 2017. Vol. 292. P. 159. DOI: [10.1007/s11207-017-1185-1](https://doi.org/10.1007/s11207-017-1185-1).

Löhner-Böttcher J., Schmidt W., Schlichenmaier R., et al. Convective blueshifts in the solar atmosphere. III. High-accuracy observations of spectral lines in the visible. *Astron. Astrophys.* 2019. Vol. 624. P. A57. DOI: [10.1051/0004-6361/201834925](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201834925).

Nechaeva A.B., Sharykin I.N., Zimovets I.V., Chen F. Relationship between the horizontal gradient of the vertical magnetic field and the horizontal electric current on the photosphere in a model active region of the Sun. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2021. Vol. 61. P. 956–963. DOI: [10.1134/S0016793221070148](https://doi.org/10.1134/S0016793221070148).

Puschmann K.G., Ruiz C.B., Martínez P.V. The electrical current density vector in the inner penumbra of a sunspot. *Astrophys. J. Lett.* 2010. Vol. 721, no. 1. DOI: [10.1088/2041-8205/721/1/L58](https://doi.org/10.1088/2041-8205/721/1/L58).

Scherrer P.H., Schou J., Bush R.I., et al. The Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) investigation for the Solar Dynamics Observatory (SDO). *Solar Phys.* 2012. Vol. 275. P. 207–227. DOI: [10.1007/s11207-011-9834-2](https://doi.org/10.1007/s11207-011-9834-2).

Tsuneta S., Ichimoto K., Katsukawa Y., et al. The Solar Optical Telescope for the Hinode Mission: An overview. *Solar Phys.* 2008. Vol. 249. P. 167–196. DOI: [10.1007/s11207-008-9174-z](https://doi.org/10.1007/s11207-008-9174-z).

Watanabe K., Masuda S., Segawa T. Hinode Flare Catalogue. *Solar Phys.* 2012. Vol. 279. P. 317–322. DOI: [10.1007/s11207-012-9983-y](https://doi.org/10.1007/s11207-012-9983-y).

Zimovets I.V., Nechaeva A.B., Sharykin I.N., Gan W.Q. Density distribution of photospheric vertical electric currents in flare-active regions of the Sun. *Astrophys. J.* 2020a. Vol. 63. P. 408–420. DOI: [10.1007/s10511-020-09645-0](https://doi.org/10.1007/s10511-020-09645-0).

Zimovets I.V., Sharykin I.N., Gan W.Q. Relationships between photospheric vertical electric currents and hard X-ray sources in solar flares: Statistical study. *Astrophys. J.* 2020b. Vol. 891, no. 2. DOI: [10.3847/1538-4357/ab75be](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab75be).

Статья подготовлена по материалам Семнадцатой ежегодной конференции «Физика плазмы в Солнечной системе», 7–11 февраля 2022 г., ИКИ РАН, Москва.

Как цитировать эту статью:

Нечаева А.Б., Зимовец И.В., Шарыкин И.Н. Сравнение функций плотности вероятности вертикального электрического тока в активных областях Солнца по данным инструментов HMI/SDO и SOT/Hinode. *Солнечно-земная физика*. 2022. Т. 8, № 3. С. 68–73. DOI: [10.12737/szf-83202210](https://doi.org/10.12737/szf-83202210).