

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ФОТОСФЕРНЫХ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ТОКОВ ВО ВСПЫШЕЧНО-АКТИВНЫХ ОБЛАСТЯХ СОЛНЦА

И.В.ЗИМОВЕЦ¹, А.Б.НЕЧАЕВА^{1,2}, И.Н.ШАРЫКИН¹, В.К.ГАН³

Поступила 6 сентября 2019

Принята к печати 24 июня 2020

В активных областях Солнца текут электрические токи. Информация о распределении токов важна для понимания процессов энерговыделения на поверхности Солнца и в вышележащих слоях. В работе представлен анализ функции плотности вероятности (PDF) абсолютного значения плотности фотосферных вертикальных электрических токов $|j_z|$ в 48 активных областях с 2010 по 2015гг. в моменты времени до и после вспышки. Вычисление $|j_z|$ выполнено посредством применения дифференциальной формы теоремы о циркуляции магнитного поля (закона Ампера) к фотосферным векторным магнитограммам инструмента Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) на борту космического аппарата Solar Dynamics Observatory (SDO). Показано, что для исследованных активных областей PDF($|j_z|$), в первом приближении, может быть аппроксимирована моделью, состоящей из сложного нормального распределения в области низких значений ($|j_z| \lesssim 9 \cdot 10^3$ статампер/см²) и спадающей степенной функции при более высоких значениях. Методом наименьших квадратов для всех областей получены параметры модели, построены гистограммы их распределения, посчитаны математические ожидания и среднеквадратические отклонения. Систематических изменений параметров модели за время вспышки не обнаружено. Явной связи параметров с классом вспышки, а также с магнитным классом Хэйла не найдено в рамках использованного подхода для рассмотренной ограниченной выборки вспышек и активных областей. Приведены аргументы в пользу предположения, что сложное нормальное распределение в области низких значений представляет шум в данных, тогда как степенной "хвост" может отражать характер процессов генерации токов в активных областях Солнца.

Ключевые слова: *активные области Солнца: электрические токи*

1. **Введение.** Магнитные поля определяют процессы солнечной активности, нагрева короны и ускорения солнечного ветра. В настоящее время магнитные поля рутинно измеряются на уровне фотосферы. Выяснено, что активные области пронизаны полями, сконцентрированными в магнитные потоковые трубки [1,2]. Опираясь на теорему о циркуляции магнитного поля (закон Ампера), установлено, что по этим трубкам могут протекать электрические токи [3,4]. Поскольку векторные магнитограммы обычно доступны только для одного узкого слоя, то в основном имеется информация о вертикальной компоненте электрического тока на фотосфере j_z . Стоит отметить, что предпринимались попытки оценить и горизонтальную составляющую электрических токов [3,5-7].

Исследование электрических токов в активных областях имеет важное значение по ряду причин [3,4,8,9]. Во-первых, свободная магнитная энергия, выделяемая в таких явлениях солнечной активности, как корональные джеты, вспышки и корональные выбросы массы (КВМ), связана с электрическими токами. Диссипация электрических токов, как продольных магнитному полю, так и в виде токовых слоев, приводит к трансформации свободной магнитной энергии в кинетическую энергию плазмы и популяций ускоренных частиц, энергию электромагнитного излучения в широком диапазоне спектра, в энергию волн. Во-вторых, джоулева диссипация токов может вносить вклад в тепловой баланс в различных слоях солнечной атмосферы. В-третьих, наличие токов может влиять на характер распространения и диссипации альфвеновских волн в активных областях, что может быть важно для проблемы нагрева короны и ускорения солнечного ветра.

В целом установлено, что есть связь между j_z и вспышечной продуктивностью активных областей [3,5,10-12]. Для дальнейшего выяснения, каким конкретно образом j_z связаны со вспышками, необходимы детальные исследования. Традиционный подход в исследовании электрических токов в активных областях состоит в построении карт плотности j_z на фотосфере на основе векторных магнитограмм и анализе связи пространственной структуры j_z с источниками электромагнитного излучения процессов солнечной активности. Выполнен ряд исследований связи источников излучения (микроволнового, $H\alpha$, ультрафиолетового, рентгеновского) вспышек с фотосферными j_z [5,13-22]. Установлено, что большой процент (>70%) вспышечных узлов, наблюдаемых в $H\alpha$, совпадает с максимумами j_z [5,13]. Однако источники жесткого рентгеновского излучения вспышек, непосредственно связанные с местами инжекции ускоренных электронов в плотные слои солнечной атмосферы, имеют тенденцию появляться на краях областей сильных j_z и избегать их локальных максимумов [17,22]. Более того, не обнаружено количественной связи между потоком жесткого рентгеновского излучения источников и величиной j_z под источниками [22]. Таким образом, поскольку связь между фотосферными j_z и вспышечными источниками жесткого рентгеновского излучения еще не до конца понятна, имеет смысл продолжать исследования и пытаться находить дополнительные закономерности, привлекая методы статистического анализа.

Несмотря на достаточно большое количество статей по исследованию j_z , нам не известны работы, в которых бы систематически исследовалась функция плотности вероятности (PDF) плотности j_z на фотосфере и связь ее характеристик с процессами энерговыделения в активных областях. Это делалось, например, для плотности электрических токов в короне на основе моделирования и экстраполяции магнитного поля из фотосферы для единичных

активных областей [23,24]. Было найдено, что PDF плотности электрических токов в короне может быть представлена степенной функцией или двойной степенной функцией (с изломом). Однако необходимо отметить, что результаты экстраполяции магнитных полей неоднозначны. Они зависят от метода экстраполяции и качества используемых граничных данных. В работе [23] также представлен пример $\text{PDF}(j_z)$ для одной вспышечно-активной области (AR12158; SOL2014-09-10) и показано визуальное отличие от PDF для корональных токов. При этом, количественного анализа $\text{PDF}(j_z)$ не выполнено, и ее форма не исследовалась.

Цель данной работы - в первом приближении исследовать форму $\text{PDF}(j_z)$ для ряда вспышечно-активных областей. Мы считаем интересным и естественным шагом проверить, имеются ли систематические отличия между $\text{PDF}(j_z)$ до и после вспышки и есть ли корреляция между параметрами $\text{PDF}(j_z)$ и рентгеновским классом вспышки, а также хэйловским магнитным классом активной области по классификации Mount Wilson [25].

2. Данные и методы. Прежде всего отметим, что идея данной работы возникла при статистическом исследовании связи вспышечных источников жесткого рентгеновского излучения и фотосферных вертикальных электрических токов j_z [22], когда было необходимо рассчитать $\text{PDF}(j_z)$ для оценки ошибки определения j_z с помощью данных инструмента Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) [26] на борту космического аппарата Solar Dynamics Observatory (SDO). Этим фактором обусловлен выбор активных областей для анализа. Были отобраны 48 активных областей за период времени с мая 2010г. по октябрь 2017г., в которых произошли вспышки различного рентгеновского класса вблизи центра солнечного диска (гелиопроекции координаты $-600'' < (x, y) < +600''$, т.е. гелиодолгота и гелиоширота вспышек в пределах $\pm 40^\circ$), и для которых можно было определить координаты источников жесткого рентгеновского излучения в диапазоне энергий 50-100кэВ по данным наблюдений космического аппарата Reuven Ramaty High-Energy Solar Spectroscopic Imager (RHESSI) [27]. Рассмотренный интервал времени определялся одновременным наблюдением Солнца при помощи SDO и RHESSI. Информация об исследованных активных областях и вспышках представлена в [22].

В данной работе использованы подготовленные векторные фотосферные магнитограммы инструмента HMI/SDO, предоставленные в свободном доступе (<http://jsoc.stanford.edu/>) в виде продукта Spaceweather HMI Active Region Patch (SHARP) [28,29]. Используются стандартные файлы данных вида "hmi.sharp_cea_720s.fits" с шагом по времени 12мин. С помощью специального алгоритма для каждого интервала времени из всего поля зрения HMI выделяется ограниченный участок (патч), соответствующий активной области и ее

окрестности. Каждому патчу присвоен свой номер HARNUM. В этих файлах вектор магнитного поля B (B_r , B_ϕ , B_θ) в сферической системе координат спроецирован на цилиндрическую сетку Ламберта ($x = \phi$, $y = (180^\circ/\pi)\sin\theta$) с одинаковой площадью ячеек $1.33 \cdot 10^5 \text{ км}^2$ на фотосфере (Lambert Cylindrical Equal-Area projection) [30,31]. 180° -ая неопределенность поперечной лучу зрения компоненты магнитного поля $B_\perp$ устранена в этих данных. С помощью пакета программ "WCS" в составе "SolarSoftWare" координаты CEA трансформированы в гелиографическую систему Stonyhurst, а затем, для удобства расчетов, в сферическую систему координат с началом в центре Солнца.

Плотность фотосферных вертикальных электрических токов рассчитана численно в сферической системе координат, используя теорему о циркуляции магнитного поля (закон Ампера) в дифференциальной форме:

$$j_z = j_r = \frac{c}{4\pi\mu} (\nabla \times \mathbf{B})_r \approx \frac{c}{4\pi} \frac{1}{R_s \sin\theta} \left(\frac{\Delta B_\phi}{\Delta\theta} \sin\theta + B_\phi \cos\theta - \frac{\Delta B_\theta}{\Delta\phi} \right), \quad (1)$$

где c - скорость света в вакууме, R_s - радиус Солнца на уровне фотосферы и коэффициент магнитной проницаемости $\mu = 1$. Для каждой рассмотренной активной области карты j_z построены для двух моментов времени: непосредственно до начала вспышки в мягком рентгеновском излучении и после окончания импульсной фазы вспышки, когда жесткое рентгеновское излучение ($>25 \text{ кэВ}$) опускается до предвспышечного уровня. Это позволяет исследовать возможные изменения PDF j_z за время вспышки, избегая вариаций j_z , которые могут возникать в результате возмущения фотосферы пучками ускоренных частиц, гидродинамическими течениями, ударными волнами и потоками электромагнитного излучения в импульсной фазе вспышки [32].

На основе полученных массивов данных, были построены гистограммы j_z с шириной бина $2.5 \cdot 10^3$ статампер/см² ($1 \text{ статампер/см}^2 = 1/3 \cdot 10^{-5} \text{ А/м}^2$). Такая фиксированная ширина бина выбрана, чтобы, во-первых, для анализа всех событий соблюсти единообразие подхода, и, во-вторых, для каждого события имелось бы более 15 бинов, но при этом число бинов с малыми значениями j_z было бы не очень велико, а число пустых бинов с высокими значениями j_z было бы мало. Исключены пустые бины, в которые попали ноль значений j_z . Далее, от полученных значений центров бинов (ось x) берутся абсолютные значения, а от абсолютных значений бинов и количества точек данных в каждом бине берется натуральный логарифм. Для двух векторов данных - значений положительных и отрицательных j_z - проведен тест Колмогорова-Смирнова, который по результатам не отвергает нулевую гипотезу о том, что эти два вектора принадлежат одному распределению, на уровне значимости 1%. Это свидетельствует о том, что мы можем рассматривать абсолютное значение $|j_z|$, вместо того, чтобы отдельно рассматривать

положительные и отрицательные значения. Такой подход увеличивает количество точек данных гистограммы вдвое, что важно для адекватного фиттирования области высоких значений $|j_z|$. В итоге, для каждого события гистограммы содержат от 30 до 40 ненулевых бинов, что значительно выше количества свободных параметров функций, используемых для фиттирования (см. ниже). Перед фиттированием гистограммы нормированы на максимальное значение. Такие гистограммы можно рассматривать в качестве приближения PDF абсолютного значения плотности фотосферных вертикальных электрических токов $|j_z|$. Отметим, что для получения приближения PDF надо нормировать на общее количество точек используемого массива $|j_z|$. Однако мы решили нормировать на максимум, чтобы значения гистограммы варьировались от 0 до 1. Это не сказывается на результатах данной работы.

На рис.1 приведены примеры полученных гистограмм (распределений) $|j_z|$ в лог-лог масштабе для двух активных областей для моментов времени до и после вспышки. Для всех остальных событий гистограммы аналогичны. При низких значениях $|j_z|$ распределение имеет форму гауссова "колокола", а при более высоких - наклонного спадающего "хвоста". Исходя из формы распределения $|j_z|$, мы выполнили аппроксимацию моделью, представляющей из себя сложное нормальное распределение в области низких значений $|j_z|$ и спадающую степенную функцию в области более высоких значений. Данные делятся на два набора: в первом $n > 5$ первых точек (бинов) по возрастанию значения $x (|j_z|)$,

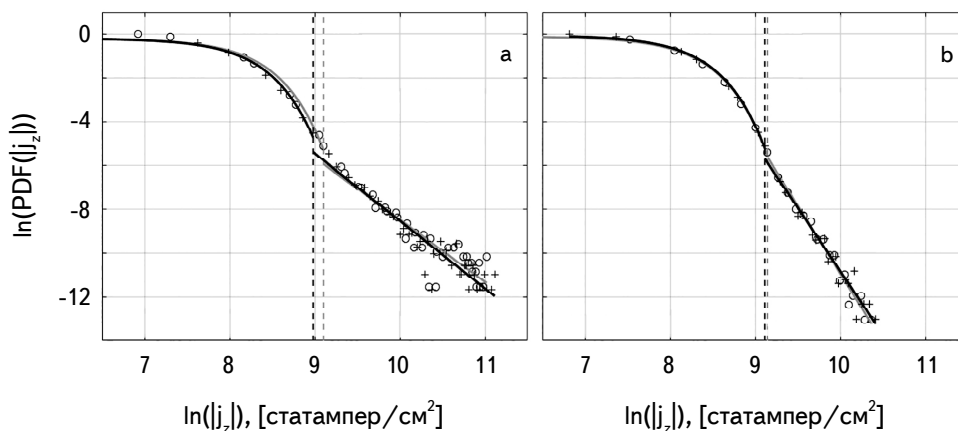


Рис.1. Примеры распределений $|j_z|$ в лог-лог масштабе для двух активных областей: NOAA 12172 до и после вспышки SOL2014-09-24T17:45 (слева) и NOAA 11263 до и после вспышки SOL2011-08-03T04:29 (справа). Распределения $|j_z|$ до и после вспышки показаны кружками и крестиками, соответственно. Аппроксимации моделью распределений до и после вспышки методом наименьших квадратов показаны серой и черной сплошными кривыми, соответственно. Черные и серые кривые близки друг к другу и почти перекрываются, поэтому их сложно различить. Вертикальные пунктирные линии показывают положения точки перехода между сложным нормальным распределением и степенной функцией.

во втором $(N - n) > 5$ последних, где N - полное количество точек. При этом оба набора данных имеют одну общую точку, которую в дальнейшем мы называем точкой перехода (transition point, tp). Первый набор данных аппроксимируется (в лог-лог масштабе) сложным нормальным распределением для модуля случайной величины [33,34], второй - степенной функцией:

$$f(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ ae^{-([x-b]/c)^2} + ae^{-([x+b]/c)^2}, & 0 \leq x \leq x_{tp} \\ dx^p, & x \geq x_{tp}. \end{cases} \quad (2)$$

Значение точки перехода, x_{tp} , выбирается на основе минимизации абсолютного значения линейного отклонения модели от данных $|y_{data} - y_{model}|$.

Все аппроксимации проводились с помощью функции "nlinfit" (MATLAB), использующей алгоритм Левенберга-Марквардта для решения задачи о наименьших квадратах. Для каждого случая качество аппроксимации определялось с помощью скорректированного коэффициента детерминации:

$$R_{adj}^2 = 1 - \frac{SS_{res}/(n-k)}{SS_{tot}/(n-1)}, \quad (3)$$

где SS_{res} - сумма квадратов остатков регрессии, SS_{tot} - общая сумма квадратов, n - количество наблюдений и k - количество параметров модели. Чем ближе R_{adj}^2 к 1, тем ближе модель к данным.

После того как параметры модели были получены для всех рассмотренных активных областей, мы проверили наличие их корреляции с рентгеновским классом вспышек (по данным космических аппаратов Geostationary Operational Environmental Satellite - GOES), перед началом которых посчитаны распределения $|j_z|$, а также с хэйловским магнитным классом родительских активных областей (классификация Mount Wilson). Эта вспомогательная информация взята с сайта <https://solarmonitor.org/>.

3. Результаты. Визуальный анализ показал, что используемая модель (2) вполне адекватно аппроксимирует построенные распределения $|j_z|$ для всех 48 рассмотренных областей. Из 96 распределений $|j_z|$ (по 48 до и после вспышки) только 34 (35%) оказались с $R_{adj}^2 < 0.95$. На рис.1 представлены характерные примеры применения модели для двух событий: 1) SOL2014-09-24T17:45 в активной области NOAA 12172 и 2) SOL2011-08-03T04:29 в активной области NOAA 11263. Для активной области NOAA 12172 использованы две векторные магнитограммы SHARP для моментов времени 17:36 UT до и 18:00 UT после вспышки, для NOAA 11263 - для моментов времени 04:24 UT и 04:36 UT. Можно отметить, что для NOAA 12172 (рис.1, левая панель) есть расхождение некоторых точек данных с моделью в области

высоких значений $\ln|j_z| > 10$. Это может быть связано как с малой статистикой точек данных на "хвосте" распределения, так и с реальным отклонением от степенного закона при больших значениях токов. Изучение этого вопроса выходит за рамки данной работы.

На рис.2 в виде гистограмм построены распределения основных параметров модели: (a) математическое ожидание распределения Гаусса (численно равно параметру b из (2)), (b) среднеквадратичное (стандартное) отклонение распределения Гаусса (численно равно $c/\sqrt{2}$ из (2)), (c) точка перехода (x_{tp} из (2)), (d) абсолютное значение показателя степенной функции ($|p|$ из (2)). Получившиеся распределения аппроксимированы гауссианой и получены

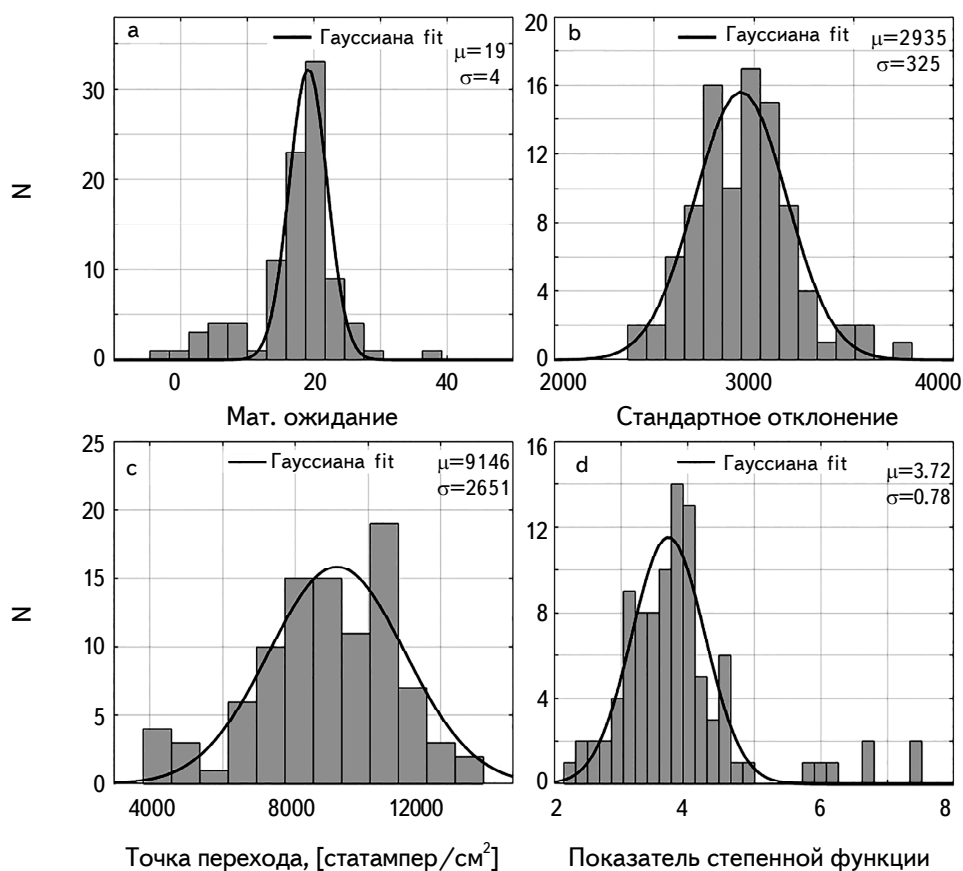


Рис.2. Гистограммы значений параметров модели, полученные для 96 распределений $|j_z|$ (по 48 до и после вспышки): а) математическое ожидание сложного нормального распределения, б) стандартное отклонение сложного нормального распределения, в) точка перехода между сложным нормальным распределением и степенной функцией, г) абсолютное значение показателя степенной функции. Результаты аппроксимации гистограмм функцией Гаусса показаны черной жирной кривой. Значения математического ожидания μ и стандартного отклонения σ функции Гаусса приведены в верхнем правом углу соответствующих панелей.

математические ожидания, μ , и среднеквадратичные отклонения, σ , параметров. Полученные значения вынесены в легенды соответствующих графиков (рис.2): (а) математическое ожидание распределения Гаусса 19 ± 4 статампер/см², (b) среднеквадратичное отклонение распределения Гаусса $(2.9 \pm 0.3) \cdot 10^3$ статампер/см⁵, (с) точка перехода к степенной функции $(9.1 \pm 2.7) \cdot 10^3$ статампер/см², (d) абсолютное значение показателя степенной функции 3.72 ± 0.78 . Также мы посчитали μ и σ этих же параметров модели напрямую, без аппроксимации гауссианой: (а) 18 ± 6 статампер/см², (b) $(2.9 \pm 0.3) \cdot 10^3$ статампер/см², (с) $(8.9 \pm 1.9) \cdot 10^3$ статампер/см², (d) 3.89 ± 0.96 , соответственно. Полученные в

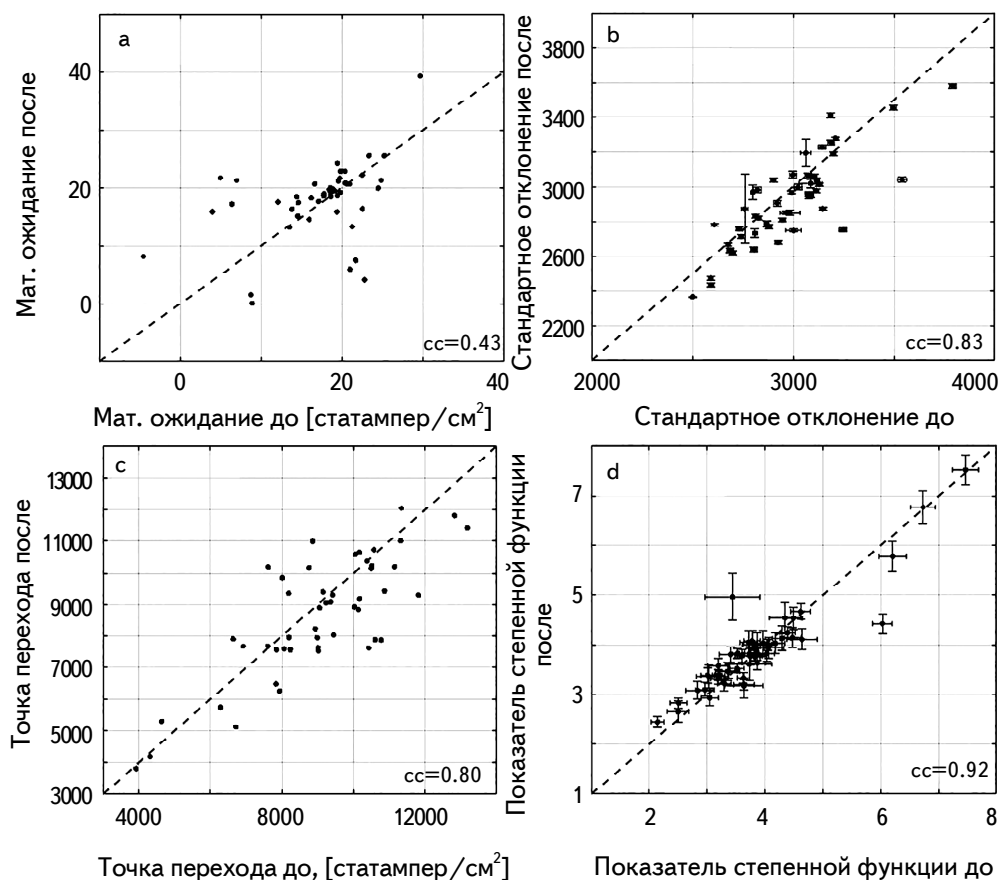


Рис.3. Параметры модели распределений $|j_z|$ 48 рассмотренных активных областей до (ось x) и после (ось y) вспышки: а) математическое ожидание сложного нормального распределения, б) стандартное отклонение сложного нормального распределения, с) точка перехода между сложным нормальным распределением и степенной функцией, d) абсолютное значение показателя степенной функции. Ошибки определения (кроме а) параметров показаны тонкими горизонтальными и вертикальными отрезками. Пунктирная линия - функция $y = x$. На всех рисунках в правом нижнем углу приведены коэффициенты корреляции cc .

результате аппроксимации гауссианой значения μ и σ параметров модели близки к средним значениям и среднеквадратичным отклонениям, посчитанным напрямую без аппроксимации.

Для всех 48 рассмотренных активных областей проведено сопоставление обозначенных выше параметров модели до и после вспышек (рис.3) и посчитаны линейные коэффициенты корреляции Пирсона: (а) для математического ожидания гауссианы 0.43 [0.17, 0.64]; (b) для среднеквадратичного отклонения гауссианы 0.83 [0.71, 0.90]; (с) для точки перехода 0.80 [0.67, 0.88]; (d) для модуля показателя степенной функции 0.92 [0.86, 0.95]. В квадратных скобках приведен доверительный интервал 95% оценки коэффициента корреляции параметров. Наиболее сильная корреляция - для показателя степенной функции модели. Систематического изменения параметров модели за время вспышки не наблюдается для рассмотренной выборки областей.

В качестве дополнения проверено, имеется ли явная связь между параметрами моделей и рентгеновским классом вспышек, а также хэйловским магнитным классом активных областей. Для этого построены графики зависимостей рентгеновских классов вспышек и хэйловских классов областей от параметров модели. В качестве примера на рис.4 приведены графики зависимостей абсолютного значения показателя степенной функции модели от класса вспышки (слева) и хэйловского класса (справа). Визуальный анализ графиков не выявил явной связи. Можно отметить, что большая часть (29

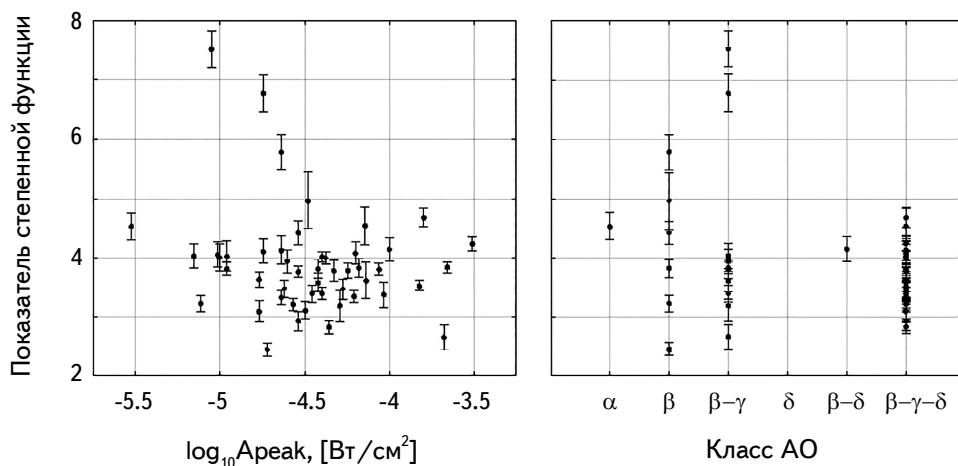


Рис.4. Графики зависимостей абсолютного значения показателя степенной функции модели, использованной для аппроксимации распределения $|j_z|$ в активных областях до вспышки, от десятичного логарифма пикового потока рентгеновского излучения Солнца в канале 1-8 Å GOES во время вспышки, т.е. класса вспышки со знаком минус (слева), и хэйловского магнитного класса активных областей (справа). Ошибки определения параметров показаны тонкими вертикальными отрезками.

или 60%) рассмотренных активных областей имела магнитный класс $\beta\gamma\delta$. Так как известно, что $\beta\gamma\delta$ -области имеют тенденцию производить больше вспышек, включая мощные [35], то это представляется вполне естественным, поскольку отобранные вспышки были довольно мощными и сопровождались жестким рентгеновским излучением >50 кэВ.

4. *Обсуждение.* На основе векторных магнитограмм SHARP_CEA, полученных по данным наблюдений HMI/SDO для выборки из 48 активных областей, в которых происходили вспышки различных рентгеновских классов (см. [22]), построены распределения абсолютного значения плотности фотосферных вертикальных электрических токов $\text{PDF}(|j_z|)$. Исходя из визуального анализа формы $\text{PDF}(|j_z|)$, выбрана аналитическая модель и проведена аппроксимация методом наименьших квадратов. В первом приближении форма $\text{PDF}(|j_z|)$ может быть аппроксимирована сложением нормальным распределением в области низких значений $|j_z|$ и спадающей степенной функцией в области более высоких значений. Точка перехода между двумя функциями имеет среднее значение $\langle |j_z|_{tp} \rangle \approx 9 \cdot 10^3$ статампер/см². Мы полагаем, что распределение в области низких значений определяется шумами используемых векторных магнитограмм, тогда как степенной "хвост" может быть близок к реальному распределению $|j_z|$ и может быть связан с физикой магнитных полей и электрических токов в активных областях Солнца.

Для обоснования предположения о приборном (шумовом) характере распределения при низких значениях распределение $|j_z|$ для площади всей области, определенной в SHARP, сравнено с распределением, посчитанным только для окраин этой области. На окраинах нет значительных магнитных полей (≤ 50 Гс), следовательно и $|j_z|$, и они могут представлять собой области спокойного Солнца, где показания HMI/SDO, по крайней мере частично, являются шумом. Для этого рассмотрены полоски шириной 50 пикселей по периметру области. Примеры распределений $|j_z|$ для двух областей NOAA 12172 и 11263 приведены на рис.5. Распределение $|j_z|$ для фоновой области можно представить сложением нормальным распределением и не имеет явного степенного "хвоста", тогда как для всей активной области распределение имеет вид сложного нормального распределения на низких значениях и ярко выраженного степенного "хвоста" в области более высоких значений. При этом сложное нормальное распределение для фоновой области близко к сложному нормальному распределению для полной области.

Для дополнительного подтверждения того, что сложное нормальное распределение представляет собой распределение шума $|j_z|$, оценим ошибку поперечной лучу зрения компоненты магнитного поля $\sigma(B_\perp)$ из полученного

среднеквадратичного отклонения гауссианы распределения $|j_z|$ ($\sigma(|j_z|) \approx (2.9 \pm 0.3) \cdot 10^3$ статампер/см²): $\sigma(B_\perp) \approx [4\pi\Delta l \sigma(|j_z|)]/[c\sqrt{2}] \approx 31 \pm 3$ Гс, где $\Delta l \approx 3.6 \cdot 10^7$ см - линейный размер пикселя HMI/SDO на фотосфере, c - скорость света в вакууме. Полученное значение $\sigma(B_\perp)$ лежит между пороговыми значениями 20 Гс (до 2014г.) и 50 Гс (после), определенными для поперечной компоненты магнитного поля на векторных магнитограммах HMI/SDO (параметр DOFFSET, [29]). Это является веским доводом в пользу сделанного предположения.

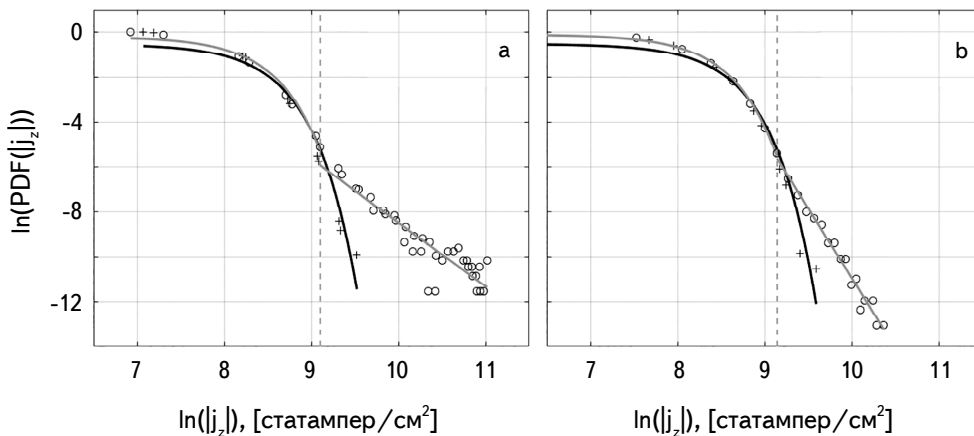


Рис.5. Распределения в лог-лог масштабе $|j_z|$ в двух активных областях NOAA 12172 до вспышки SOL2014-09-24T17:45 (слева) и NOAA 11263 до вспышки SOL2011-08-03T04:29 (справа). Кружками показаны данные, полученные для полной области SHARP, крестиками - для фонового участка спокойного Солнца. Аппроксимация для фонового участка сложным нормальным распределением показана черной кривой, для всей области - серой кривой, представляющей совокупность сложного нормального распределения ниже точки перехода (обозначена вертикальным пунктиром) и степенной функции выше точки перехода.

Аргументом в пользу того, что степенной "хвост" распределения $|j_z|$ не является шумом, может служить то обстоятельство, что точка перехода от гауссианы к степенному распределению наблюдается на значениях $(|j_z|_{tp} = (8.9 \pm 1.9) \cdot 10^3$ статампер/см²), близких к утроенному стандартному отклонению гауссианы $3\sigma_{stdev}(|j_z|) = (8.7 \pm 0.9) \cdot 10^3$ статампер/см². Это указывает на то, что при исследовании вертикальных токов на фотосфере по данным HMI/SDO следует использовать правило "трех сигм" и рассматривать только значения, превышающие $3\sigma_{stdev}(|j_z|)$, а к более низким значениям $|j_z|$ относиться с предельной осторожностью.

Наличие степенного "хвоста" в распределениях $|j_z|$ активных областей Солнца представляется интересным фактом. Это может указывать на специфический турбулентный характер процессов формирования электрических токов. По существу, это неудивительно, поскольку известно, что степенной

вид имеют распределения различных характеристик фотосферного магнитного поля, в частности, магнитного потока [36], производной от которого является j_z . Спектр мощности магнитного поля также имеет степенной вид [37,38]). Степенной характер присущ и пространственным характеристикам токовой спиральности активных областей [39]. Степенные распределения характерны для фрактально-кластерных систем, к которым можно отнести активные области Солнца (например, [40,41]). Мы установили, что для выборки рассмотренных 48 активных областей, модуль показателя степенной функции распределения $|j_z|$ имеет значения 3.89 ± 0.96 . Вопрос о том, какими конкретно процессами обусловлены эти значения, требует дальнейшего изучения.

В завершение, отметим, что в рамках использованного подхода не обнаружена явная корреляция между параметрами рассмотренных моделей $\text{PDF}(j_z)$ для исследованной ограниченной выборки активных областей и рентгеновским классом произошедших в них вспышек. Это можно интерпретировать тем, что параметры моделей определяются распределением $|j_z|$ целой активной области с масштабами в несколько сотен угловых секунд, тогда как вспышка является локальным процессом, занимающим обычно малую часть родительской активной области (несколько угловых секунд или десятков угловых секунд). В дальнейшем, представляется интересным исследовать статистическую связь характеристик вспышек и параметров локальных распределений $|j_z|$ во вспышечных областях, в частности, ограниченных вспышечными лентами в окрестности фотосферной линии инверсии магнитной полярности. Более того, вспышки обычно происходят в окрестности экстремумов j_z [5,13,14], значения которых вносят вклад в самый "хвост" распределения $|j_z|$, где могут наблюдаться отклонения от степенной зависимости (см. рис.1). Эти отклонения могут быть связаны как с флуктуациями из-за малой статистики точек с экстремальными значениями, так и с физикой формирования экстремальных токов в активных областях. Простой аппроксимации распределения $|j_z|$ степенной функцией может быть недостаточно для выявления вариаций распределения во время вспышек. Этот вопрос требует дальнейшего изучения. Наконец, отсутствие явной связи между параметрами распределений $|j_z|$ и магнитным классом активных областей можно объяснить недостаточностью разнообразия исследуемой выборки (более половины рассмотренных областей имели класс $\beta\gamma\delta$) или же чрезмерно описательным (неколичественным) характером хэйловской классификации активных областей, не умаляя ее достоинств.

Мы благодарны коллективу эксперимента Helioseismic and Magnetic Imager на борту космического аппарата Solar Dynamics Observatory за векторные фотосферные магнитограммы серии SHARP, предоставленные в свободном доступе в сети Интернет. Мы также благодарны анонимным рецензентам за ряд полезных замечаний, способствовавших улучшению качества статьи.

Начальная фаза данного исследования осуществлялась в рамках проекта CHINESE ACADEMY OF SCIENCES President's International Fellowship Initiative (GRANT No. 2018VMB0007). Основная часть работы (обработка и анализ данных, интерпретация результатов, подготовка статьи) выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект №17-72-20134).

¹ Институт космических исследований РАН, Россия,
e-mail: ivanzim@iki.rssi.ru ivan.sharykin@phystech.edu

² Московский физико-технический институт (государственный университет),
Россия, e-mail: nechaeva.ab@phystech.edu

³ Обсерватория Пурпурной горы Китайской академии наук,
Китай, e-mail: wqgan@pmo.ac.cn

DENSITY DISTRIBUTION OF PHOTOSPHERIC VERTICAL ELECTRIC CURRENTS IN FLARE ACTIVE REGIONS OF THE SUN

I.V.ZIMOVETS¹, A.B.NECHAeva^{1,2}, I.N.SHARYKIN¹, W.Q.GAN³

Solar active regions contain electric currents. Information on the distribution of currents is important for understanding the processes of energy release on the surface of the Sun and in the overlying layers. The paper presents an analysis of the probability density function (PDF) of the absolute value of the photospheric vertical electric current density $|j_z|$ in 48 active regions from 2010 to 2015 at times before and after flares. Calculation of $|j_z|$ is performed by applying the differential form of Ampere's circuital law to photospheric vector magnetograms obtained from observations of the Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) instrument onboard the Solar Dynamics Observatory (SDO). It is shown that for the studied active regions PDF($|j_z|$) can be present, in the first approximation, by the model consisting of the folded normal distribution in the low- $|j_z|$ region ($|j_z| \lesssim 9 \cdot 10^3$ statampere/cm²) and the decaying power-law function in the region of higher $|j_z|$ values. We obtained the model parameters using the least squares method, constructed histograms of their distributions, and calculated mathematical expectations and standard deviations. No systematic changes in the model parameters during the flares are detected. We did not find an explicit connection between the model parameters and the flare X-ray class, as well as with the Hale magnetic class of the active regions, in the frames of the approach used on a selected sample of the flares and active regions. Arguments are presented in favor of the suggestion

that the folded normal distribution in the low-value region of $\text{PDF}(|j_z|)$ represents noise in the data, while the power-law "tail" can reflect the nature of electric currents in the solar active regions.

Keywords: *Solar active regions: electric currents*

ЛИТЕРАТУРА

1. *J.O.Stenflo*, Solar Magnetic Fields. Polarized Radiation Diagnostics. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 1994.
2. *M.Ryutova*, Physics of Magnetic Flux Tubes. Berlin, Springer-Verlag, 2015.
3. *А.Б.Северный*, Некоторые проблемы физики Солнца, М., Наука, 1988.
4. *G.D.Fleishman, A.A.Pevtsov*, Geophys. Mon. Ser., **235**, 43, 2018.
5. *А.М.Зверева, А.Б.Северный*, Изв. КрАО, **41/42**, 97, 1970.
6. *K.G.Puschmann, B.R.Cobo, V.M.Pillet*, Astrophys. J., **721**, L58, 2010.
7. *Ю.А.Фурсяк, В.И.Абраменко*, Астрофизика, **60**, 593, 2017, (Astrophysics, **60**, 544, 2017).
8. *B.Schmieder, G.Aulanier*, Geophys. Mon. Ser., **235**, 391, 2018.
9. *А.В.Степанов, В.В.Зайцев*, Магнитосферы активных областей Солнца и звезд. М., Физматлит, 2019.
10. *В.И.Абраменко, С.И.Гопасюк, М.Б.Огирь*, Изв. КрАО, **81**, 8, 1990.
11. *I.Kontogiannis, M.K.Georgoulis, S.-H.Park et al.*, Solar Phys., **292**, 159, 2017.
12. *Yu.A.Fursyak*, Geomagn. Aeronom., **58**, 1129, 2018.
13. *G.E.Moreton, A.B.Severny*, Sol. Phys., **3**, 282, 1968.
14. *В.А.Романов, Т.Т.Цан*, Астрон. ж., **67**, 1300, 1990, (Sov. Astron., **34**, 656, 1990).
15. *В.И.Абраменко, С.И.Гопасюк, М.Б.Огирь*, Изв. КрАО, **83**, 3, 1991.
16. *R.C.Canfield, J.-F. de La Beaujardiere, K.D.Leka*, Phil. Trans. R. Soc. Lond. A, **336**, 381, 1991.
17. *J.Li, T.R.Metcalf, R.C.Canfield et al.*, Astrophys. J., **482**, 490, 1997.
18. *S.Musset, N.Vilmer, V.Bommier*, Astron. Astrophys., **580**, A106, 2015.
19. *I.N.Sharykin, A.G.Kosovichev*, Astrophys. J. Lett., **788**, L18, 2014.
20. *I.N.Sharykin, A.G.Kosovichev, I.V.Zimovets*, Astrophys. J., **807**, id.102, 2015.
21. *М.А.Лившиц, И.Ю.Григорьева, И.И.Мышьяков et al.*, Астрон. ж., **93**, 907, 2016, (Astron. Rep, **60**, 939, 2016).
22. *I.V.Zimovets, I.N.Sharykin, W.Q.Gan*, Astrophys. J., **891**, id.138, 2020.
23. *J.Kang, T.Magara, S.Inoue et al.*, Publ. Astron. Soc. Japan, **68**, 101, 2016.
24. *K.Moraitis, A.Toutountzi, H.Isliker et al.*, Astron. Astrophys., **596**, A56, 2016.
25. *G.E.Hale, F.Ellerman, S.B.Nicholson et al.*, Astrophys. J., **49**, 153, 1919.
26. *P.H.Scherrer, J.Schou, R.I.Bush et al.*, Sol. Phys., **275**, 207, 2012.

27. *R.P.Lin, B.R.Dennis, G.J.Hurford et al.*, Sol. Phys., **210**, 3, 2002.
28. *M.G.Bobra, X.Sun, J.T.Hoeksema et al.*, Sol. Phys., **289**, 3549, 2014.
29. *J.T.Hoeksema, Y.Liu, K.Hayashi et al.*, Sol. Phys., **289**, 3483, 2014.
30. *M.R.Calabretta, E.W.Greisen*, Astron. Astrophys., **395**, 1077, 2002.
31. *W.T.Thompson*, Astron. Astrophys., **449**, 791, 2006.
32. *V.M.Sadykov, A.G.Kosovichev, I.N.Kitiashvili et al.*, Astropys. J., **893**, id.24, 2020.
33. *F.C.Leone, L.S.Nelson, R.B.Nottingham*, Technometrics, **3**, 543, 1961.
34. *R.C.Elandt*, Technometrics, **3**, 551, 1961.
35. *S.Toriumi, H.Wang*, Liv. Rev. Sol. Phys., **16**, 128, 2019.
36. *V.I.Abramenko, D.W.Longcope*, Astrophys. J., **619**, 1160, 2005.
37. *V.I.Abramenko*, Astrophys. J., **629**, 1141, 2005.
38. *V.Abramenko, V.Yurchyshyn*, Astrophys. J., **720**, 717, 2010.
39. *A.S.Kutsenko, V.I.Abramenko, K.M.Kuzanyan et al.*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **480**, 3780, 2018.
40. *Э.И.Мозилевский*, Фракталы на Солнце. М., ФИЗМАТЛИТ, 2001.
41. *M.Aschwanden*, Self-Organized Criticality in Astrophysics. The Statistics of Nonlinear Processes in the Universe, Berlin, Springer-Verlag, 2011.