

На правах рукописи



Фурсяк Юрий Алексеевич

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТОКИ В ФОТОСФЕРЕ
АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ НА СОЛНЦЕ**

Специальность 01.03.03 – физика Солнца

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Научный – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном учреждении науки Крымской астрофизической обсерватории Российской академии наук (ФГБУН «КрАО РАН»).

Научный руководитель:

АБРАМЕНКО Валентина Изосимовна

доктор физико-математических наук,

заведующая Отделом физики Солнца и солнечной системы Крымской астрофизической обсерватории Российской академии наук (КрАО РАН)

Официальные оппоненты:

ОБРИДКО Владимир Нухимович,

доктор физико-математических наук, профессор,

главный научный сотрудник Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук (ИЗМИРАН)

ЗОЛОТОВА Надежда Валерьевна,

Доктор физико-математических наук,

доцент Санкт-Петербургского государственного университета

Ведущая организация:

Федеральное Государственное бюджетное учреждение науки Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЗФ СО РАН)

Защита состоится 17 декабря 2021 г. в 11 час. 15 мин. на заседании диссертационного совета Д 002.120.01 на базе Главной (Пулковской) астрономической обсерватории Российской академии наук по адресу: 196140, Санкт-Петербург, Пулковское шоссе, д. 65, корп. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГАО РАН и на сайте ГАО РАН (http://www.gaoran.ru/wp-content/uploads/2021/08/Fursyak_Yu_A_Dissertatsia.pdf).

Автореферат разослан 17 ноября 2021 г.

И.о. ученого секретаря

диссертационного совета

Д 002.120.01

доктор физ.-мат. наук



В.В. Бобылев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Природа накопления энергии в активной области (АО) и ее высвобождения во вспышках остается одной из основных проблем современной физики Солнца. Данная проблема имеет как чисто научное, познавательное, так и прикладное значение. Поскольку эруптивные события в верхних слоях солнечной атмосферы имеют непосредственное влияние на технические системы и живые организмы на Земле, весьма актуальными и по сегодняшний день остаются вопросы качественного краткосрочного (с заблаговременностью 1-3 дня) прогноза солнечной активности и прогноза космической погоды в целом. Однако без понимания физики наблюдаемых процессов и явлений, качественное прогнозирование вспышек в принципе невозможно.

Различные формы нестационарных процессов на Солнце указывают на присутствие в короне значительного запаса избыточной («свободной») магнитной энергии [6, 9, 10, 12, 17, 18 и др.] в виде непотенциальных полей, поддерживаемых электрическими токами.

Роль системы электрических токов в возникновении и протекании вспышечного процесса была рассмотрена уже в 50-60-х гг. 20-го века [2, 3, 7, 16]. На протяжении второй половины 20-го века был получен обширный наблюдательный материал, позволивший изучить основные свойства токовых систем в АО, отработать методы вычисления электрических токов в фотосфере и в более высоких слоях солнечной атмосферы, построить теоретические модели, позволяющие более глубоко понять взаимосвязь системы электрических токов с эволюцией АО и нестационарными процессами в атмосфере Солнца. Помимо локальных, мелкомасштабных токов, в конце 80-х гг. 20-го века были обнаружены токовые системы больших масштабов – глобальные электрические токи – уходящие высоко в хромосферу и корону, охватывающие всю АО или же большую ее часть, и выносящие в верхние слои солнечной атмосферы энергию порядка 10^{32} эрг [1, 6].

В последние десятилетия количество исследовательских работ, посвященных изучению электрических токов в АО, существенно возросло. Связано это как с развитием наблюдательной и технической базы для изучения Солнца, так и с пониманием важности роли токовых систем в эволюции АО, процессах диссипации и трансформации магнитной энергии в другие ее виды [8, 10, 11, 13, 14, 19, 20, 21, и др.]. Учитывая большие объемы поступающих научных данных, а также исключительную роль электрических токов в возникновении и развитии нестационарных процессов в верхних слоях солнечной атмосферы, любые методы и подходы к изучению токовых систем, любые результаты будут актуальными и востребованы в современном научном сообществе. Собственно, изучению

токовых систем различных масштабов, их динамики и связи со вспышечной продуктивностью АО и посвящена выполненная диссертационная работа.

Цели и задачи

Цель работы – исследование структуры и динамики токовых систем различных масштабов в активных областях на Солнце; выявление взаимосвязи между параметрами электрического тока и нестационарными процессами в верхних слоях солнечной атмосферы.

Для достижения указанной цели были поставлены и последовательно решены следующие задачи:

1) Адаптация под данные современных инструментов методики оценки величины квадрата плотности горизонтального электрического тока в фотосфере АО.

2) Адаптация под данные современных инструментов методики вычисления локальных вертикальных электрических токов на основе интегральной формы закона Ампера; сопоставление полученных результатов с аналогичными данными, вычисленными классическим (на базе закона Ампера в дифференциальной форме) методом.

3) Модернизация и адаптация под данные современных инструментов методики обнаружения крупномасштабных токовых структур в АО с применением анализа структуры поперечных магнитных полей.

4) Выявление характера временных изменений параметров электрического тока в областях с различным уровнем вспышечной продуктивности; установление характера вероятностной связи этих изменений с динамикой вспышечной активности АО.

Научная новизна и практическая значимость

Соискателем предложены новые подходы к оценкам горизонтальных и вертикальных электрических токов в АО. Предложен новый подход к исследованию крупномасштабных токовых систем АО, основанный на выделении непотенциальной составляющей поперечного магнитного поля области.

Практическая значимость исследований:

1. Разработан цикл программ, позволяющий на основании современных данных о магнитных полях в атмосфере Солнца, полученных космическими обсерваториями, проводить мониторинг электрических токовых систем АО.

2. Адаптированы под данные современных инструментов методики оценки квадрата плотности горизонтального электрического тока, плотности вертикальных токов.

3. Модернизирована и адаптирована под данные современных инструментов методика обнаружения и вычисления крупномасштабного электрического тока, распределенного по большой площади АО.

4. Получены параметры электрических токов, которые могут служить основой для формирования критериев краткосрочного прогноза вспышечной активности и космической погоды.

5. Данные об усредненных за время наблюдения АО величинах беззнаковой плотности локальных вертикальных электрических токов и распределенного тока внесены в Каталог активных областей 24 цикла солнечной активности, сформированный в КрАО РАН и доступный в сети Интернет по адресу <http://sun.crao.ru/databases/catalog-mmс-ars>.

Ряд выводов диссертационной работы использован автором в систематических лекциях по астрофизике, проводимых в КрАО РАН для школьников, студентов, учителей и любителей астрономии.

Методы исследования

Основные источники – статьи в научных реферируемых журналах, труды конференций и симпозиумов, монографии. Информационная база исследований – данные наблюдений Солнца с помощью космических исследовательских аппаратов. Основной метод научного познания – сопоставление выводов, полученных из наблюдений, с выводами теоретических изысканий.

Автором применены, адаптированы под данные современных инструментов и модернизированы следующие математические методы обработки информации (в частности, данных наблюдений Солнца): метод вычисления оценки квадрата плотности поперечного электрического тока; интегральный метод вычисления локальных вертикальных электрических токов на основе магнитографических данных; метод обнаружения крупномасштабных вертикальных электрических токов на основе анализа структуры непотенциальной компоненты горизонтального магнитного поля в фотосфере.

Исходным материалом для вычисления электрических токов послужили данные о компонентах вектора магнитного поля в фотосфере, получаемые космическими обсерваториями Solar Dynamics Observatory (SDO) и Hinode. Для сопоставления временных вариаций параметров электрического тока с динамикой вспышечной активности АО дополнительно использовались данные о потоке рентгеновского излучения в диапазоне длин волн 1-8 Å на орбите Земли, получаемые КА GOES-15 (Geostationary Operational Environmental Satellite). Обработка данных проводилась с помощью IDL (Interactive Data Language) кодов, созданных соискателем.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы, подходы и методы были представлены в докладах на 9 международных и всероссийских научных конференциях:

1. Международная Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике «Физические процессы в космосе и околоземной среде». XVI конференция молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом». Иркутск, 16-21 сентября 2019 г.

2. XXIII всероссийская ежегодная конференция «Солнечная и солнечно-земная физика-2019». Санкт-Петербург, 7-11 октября 2019 г.

3. Всероссийская конференция «Физика Солнца – 2019». КрАО РАН, п. Научный, Республика Крым, 2-8 июня 2019 г.

4. XXII Всероссийская ежегодная конференция «Солнечная и солнечно-земная физика-2018». Санкт-Петербург, 8-12 октября 2018 г.

5. Конференция «Магнетизм, циклы активности и вспышки на Солнце и звездах». КрАО РАН, п. Научный, Республика Крым, 3-7 июня 2018 г.

6. XXI Всероссийская ежегодная конференция «Солнечная и солнечно-земная физика-2017». Санкт-Петербург, 9-13 октября 2017 г.

7. Всероссийская астрономическая конференция – 2017 «Астрономия: познание без границ». Ялта, Республика Крым, 17-22 сентября 2017 г.

8. XX Всероссийская ежегодная конференция «Солнечная и солнечно-земная физика-2016». Санкт-Петербург, 10-14 октября 2016 г.

9. 17-я ежегодная международная солнечная конференция «Физика солнечной плазмы и активность Солнца». КрАО РАН, п. Научный, Республика Крым, 4-10 сентября 2016 г.

Различные аспекты работы прошли предварительную экспертизу и были поддержаны грантами Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) №16-02-00221 «Динамика нестационарных процессов на Солнце», №16-42-910493 «Солнечный магнетизм на разных пространственных и временных масштабах», №17-02-00049 «Наблюдательные аспекты генерации и диссипации магнитных полей на Солнце», а также грантом Российского научного фонда (РНФ) №18-12-00131 «Магнитное поле Солнца как источник его активности на различных пространственно-временных масштабах».

Личный вклад автора

По теме диссертации опубликовано 10 работ (без тезисов), из них 6 опубликованы в современных рецензируемых журналах. Одна статья написана соискателем без соавторов. В оставшихся статьях, где имя соискателя стоит первым в списке соавторов, диссертант принимал непосредственное участие в постановке задач, выполнении расчетов, обработке, анализе, интерпретации результатов наблюдений, обсуждении полученных результатов и подготовке статей к публикации. Автором диссертационного исследования был создан ряд программ в среде программирования IDL для вычисления вертикальных, горизонтальных и распределенных электрических токов в АО по данным наблюдений компонент вектора магнитного поля, получаемым прибором

Helioseismic and Magnetic Imager на борту КА Solar Dynamics Observatory (HMI/SDO). Освоена работа с сайтами доступа к базам данных космических обсерваторий SDO и Hinode.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографии и приложения. Общий объем диссертации 212 страниц, из них 147 страниц текста, включая 33 рисунка (без учета рисунков, вынесенных в Приложение) и 4 таблицы. Библиография включает в себя 211 наименований на 23 страницах. Приложение занимает 41 страницу общего объема диссертации.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** рассмотрен ряд актуальных проблем, связанных с существованием токовых систем в АО и их связью с процессами энерговыделения в верхних слоях солнечной атмосферы. Определяется роль работ соискателя, составляющих ядро диссертационного исследования, в современных общемировых тенденциях по изучению электрических токов на Солнце, их новизна, научная и практическая значимость. Показаны цели исследования, приведены основные положения, выносимые на защиту, показан личный вклад автора, кратко изложено содержание работы.

В **Главе 1** представлено описание широко используемых методов измерения магнитных полей, базирующихся на эффектах Зеемана и Ханле, как основы для вычисления электрических токов в солнечной атмосфере. В п. 1.4 описан принцип работы первых приборов для измерения магнитных полей на Солнце – магнитографа Бэбкока, смонтированного на солнечном телескопе обсерватории Маунт-Вилсон, и солнечного магнитографа Крымской астрофизической обсерватории. Пункт 1.5 Главы 1 и его подпункты посвящены обзору современных космических обсерваторий – Solar Dynamics Observatory (SDO) и Hinode (Solar-B) – аппаратов с целым набором инструментов, множеством задач и большими объемами ежедневно поступающей информации для дальнейшего анализа. Возможность доступа к базам данных SDO и Hinode описана соответственно в п. 1.5.3 и 1.5.6.

В **Главе 2** рассмотрен метод оценки величины квадрата плотности поперечного электрического тока в фотосфере Солнца. Как известно, для вычисления поперечного тока необходима информация о векторе магнитного поля по крайней мере на двух уровнях в солнечной атмосфере, что может быть реализовано лишь малым числом современных инструментов. Однако методика, впервые предложенная в работе [5], позволяет извлечь информацию о горизонтальных токах, используя данные о распределении вертикальной

компоненты магнитного поля только на одном уровне. В исследованиях, лежащих в основе Главы 2 диссертации, этот метод был адаптирован под данные современных инструментов, полученные оценки величины квадрата плотности горизонтального тока сопоставлены с результатами вычислений, полученных ранее другими исследователями, а временные вариации проверены на соответствие основным физическим законам.

Вывод расчетной формулы детально описан в п. 2.3 Главы 2. В основе предложенной методики – закон Ампера в дифференциальной форме:

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

где: $\mathbf{B} \equiv (B_x, B_y, B_z)$ – вектор магнитного поля в фотосфере (ось z направлена вдоль нормали к солнечной поверхности); $\mu = 4\pi \times 10^{-7}$ Гн м⁻¹ – магнитная постоянная в Международной системе единиц (СИ).

Если выражение (1) возвести в квадрат и разложить правую его часть на слагаемые, то получим следующее уравнение:

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

где: j_{\perp}^2 и j_z^2 – квадраты плотности соответственно поперечной (горизонтальной) и продольной (вертикальной) составляющей вектора электрического тока в фотосфере.

Оставляя только слагаемые, связанные с поперечной составляющей плотности электрического тока и раскрывая скобки, из (2) получаем:

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

Поскольку инструмент HMI/SDO, магнитографические данные которого мы используем, как и большинство современных инструментов, измеряет вектор магнитного поля только на одном уровне в солнечной фотосфере, то вычислить производные по координате z (слагаемые во вторых квадратных скобках выражения (3)) не представляется возможным. С другой стороны, этими слагаемыми можно пренебречь только в приближении предельно тонкого слоя, так что справедливыми окажутся следующие неравенства:

$$\frac{\partial B_x}{\partial z} \ll \frac{\partial B_z}{\partial x}; \quad \frac{\partial B_x}{\partial z} \ll \frac{\partial B_z}{\partial y}; \quad \frac{\partial B_y}{\partial z} \ll \frac{\partial B_z}{\partial x}; \quad \frac{\partial B_y}{\partial z} \ll \frac{\partial B_z}{\partial y} \quad (4).$$

Если предположить, что условия (4) выполняются, то можно переписать выражение (3), пренебрегая слагаемыми, стоящими во вторых квадратных скобках правой части уравнения, тем самым получив следующую формулу:

$$j_{\perp}^2 \approx \frac{1}{\mu_0^2} \left[\left(\frac{\partial B_z}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial B_z}{\partial y} \right)^2 \right] \quad (5).$$

Если плотность электрического тока измерять в А м⁻², а магнитное поле – в Гс, и вычислить значения коэффициента, то из (5) получаем расчетную формулу для оценки квадрата плотности поперечного электрического тока в фотосфере:

$$j_{\perp}^2 \approx 6330 \times \left[\left(\frac{\partial B_z}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial B_z}{\partial y} \right)^2 \right] \quad (6).$$

Однако, следует помнить, что выражение (6) получено при очень серьезных допущениях (условие 4), поскольку спектральная линия, на основе которой получают информацию о векторе магнитного поля, формируется в некотором диапазоне высот, а не в тонком слое. Поэтому следующим шагом (п. 2.4 Главы 2) стала проверка адекватности применяемой методики, которая сводилась к поиску характера взаимосвязи временных вариаций величины поперечного тока в структурах в окрестности мелких пятен/пор исследуемой АО с динамикой величины магнитного потока в самом пятне. Показано, что: 1) динамика поперечного электрического тока, образующего вблизи мелких пятен/пор кольцевые или подковообразные структуры, хорошо согласуется с эволюционными изменениями магнитного потока в пятне, и может быть описана законом электромагнитной индукции Фарадея; 2) полученные оценки плотности горизонтального тока, как по порядку величины, так и по абсолютным значениям хорошо согласуются с величинами плотности поперечных токов, которые были получены в более ранних исследованиях. Таким образом, предлагаемая методика, несмотря на допущения, может применяться для оценки поперечных токов в атмосфере Солнца, а вычисленные значения величины j_{\perp}^2 могут быть использованы в дальнейшем как поправка при оценке модуля полного вектора тока.

Глава 3 посвящена исследованию структуры и динамики локальных вертикальных электрических токов в АО. В п. 3.3 проведено сравнение двух существующих подходов к вычислению вертикальных токов – дифференциального и интегрального. При использовании дифференциального метода применяется закон Ампера в дифференциальной форме (выражение (1)), из которого для вычисления вертикальных токов получаем формулу:

$$j_z = \frac{1}{\mu_0} \left(\frac{\partial B_y}{\partial x} - \frac{\partial B_x}{\partial y} \right) \quad (8).$$

Для вычисления производных в правой части (8) был применен приближенный метод. Тогда:

$$j_z = c_{diff} (s_1 - s_2) \quad (9),$$

где: $s_1 = \frac{\partial B_y}{\partial x}$ и $s_2 = \frac{\partial B_x}{\partial y}$ – значения производных по соответствующим сторонам (Рис. 1а), а $c_{diff} = \frac{1}{kh\mu_0}$ – коэффициент, зависящий от выбора инструмента для получения исходных магнитографических данных (параметр h – размер пиксела на магнитограмме в линейном масштабе) и количества узлов сетки, используемых при дифференцировании (при дифференцировании по пяти узлам, например, $k = 12$).

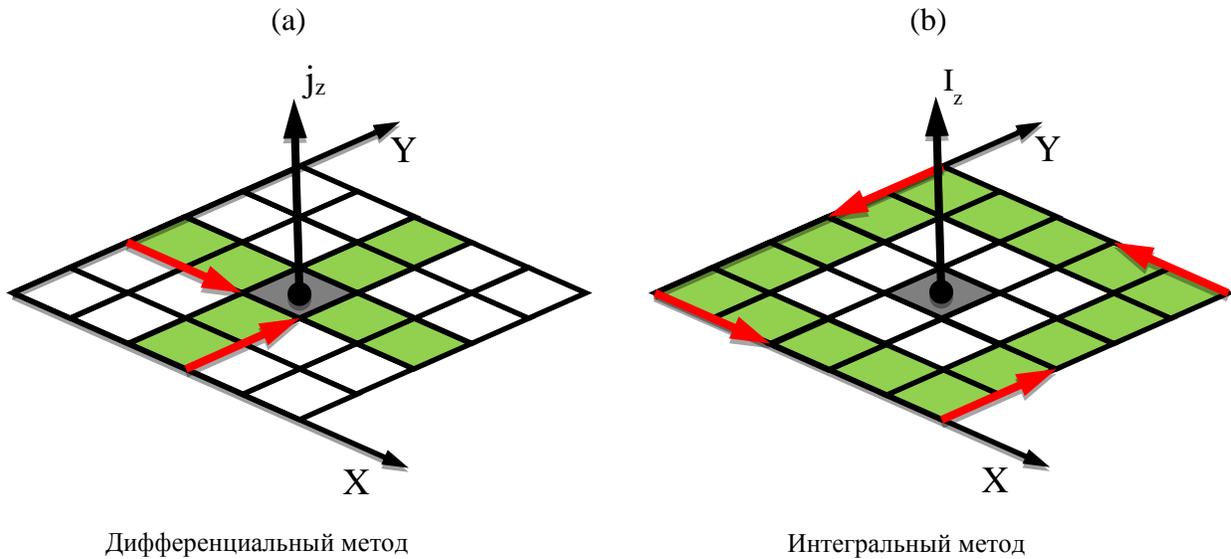


Рис. 1. Схема расчета величины плотности вертикального электрического тока дифференциальным методом с применением дифференцирования по пяти узлам (пикселям) (а) и вертикального электрического тока интегральным методом (б) для контура 5×5 узлов. Зеленые квадратики являются узлами сетки, в которых при вычислениях использованы данные о B_x и B_y компонентах магнитного поля. Темно-серым выделен пиксел, в котором вычисляются соответствующие значения плотности тока согласно формуле (9) или тока, протекающего внутри контура, согласно выражению (11). Жирная черная стрелка указывает направление положительного по знаку тока (направленного на наблюдателя).

Альтернативный, интегральный метод, базируется на интегральной форме закона Ампера и формуле Стокса:

$$I_z = \frac{1}{\mu_0} \oint_L B_l dl \quad (10),$$

где L – замкнутый контур, а B_l – значение функции в узлах сетки вдоль контура L .

Интеграл в правой части выражения (7) вычисляется методом Симпсона. Применяя формулу Симпсона для расчета интегралов по каждой из четырех сторон прямоугольного контура, обходя его против часовой стрелки (Рис. 1б), получим выражение:

$$I_z = c_{int}(s_1 + s_2 - s_3 - s_4) \quad (11),$$

где величины s_1, s_2, s_3 и s_4 являются интегральными суммами по соответствующим сторонам контура, а коэффициент $c_{int} = \frac{h}{3\mu_0}$ есть величина, зависящая от выбора инструмента (параметр h – шаг интегрирования или размер пиксела на магнитограмме). Принимаем, что интегральный ток, протекающий в области, ограниченной контуром, относится к центральному узлу (пикселу). Для вычисления значения плотности вертикального тока в центральном пикселе

контура, вычисленный согласно формуле (11) результат делится на площадь, охваченную этим контуром.

Наше исследование показало ряд преимуществ использования интегрального метода по сравнению с дифференциальным, в частности: значительно лучшее сглаживание шумов при одновременном сохранении информации о значимых структурах вертикального электрического тока, отсутствие ложных сигналов и отсутствие необходимости дифференцирования магнитного поля.

В п. 3.4 Главы 3 была выполнена проверка интегрального метода путем сравнения результатов вычисления вертикальных электрических токов в фотосфере на основе данных о структуре магнитных полей в фотосфере двух инструментов – спектрополяриметра SOT-SP/Hinode и HMI/SDO. Коэффициент корреляции Пирсона при сопоставлении результатов составил 0.77, что подтвердило возможность применения интегрального метода для вычисления вертикального электрического тока, используя однотипные магнитографические данные различных инструментов.

В п. 3.5 проводится сопоставление временных вариаций параметров вертикального (вычисленного на основе интегрального метода) и горизонтального (вычисленного согласно методике, описанной в Главе 2) электрического тока с уровнем и динамикой вспышечной продуктивности 39 АО 24-го цикла солнечной активности. Наиболее высокая корреляция со вспышечной активностью обнаружена для величин суммарного беззнакового вертикального тока (коэффициент корреляции Пирсона $k = 0.48$) и средней беззнаковой плотности вертикального тока $\langle |j_z| \rangle$ ($k = 0.72$). Наиболее важным результатом стало обнаружение «критического» значения величины $\langle |j_z| \rangle \approx 2.7 \text{ мА м}^{-3}$: для всех без исключения, областей с высокой активностью (вспышки рентгеновских классов М и/или Х за время нашего мониторинга), находящихся на восходящей ветви своего развития, или вблизи эпохи максимума величина $\langle |j_z| \rangle$ была выше порогового значения (Рис. 2). К тому же, на примере областей со всплытием магнитного потока NOAA 11158 и 12673 показано, что превышение «критического» уровня величины $\langle |j_z| \rangle$ предполагает рост вероятности развития мощных вспышечных процессов по истечению временного интервала в 12-20 часов.

Глава 4 диссертации посвящена изучению крупномасштабных токовых систем в АО их связи со вспышечной продуктивностью области. В исследованиях, лежащих в основе Главы 4, метод обнаружения крупномасштабных токовых систем в АО [1] был адаптирован под данные современных инструментов, модернизирован и применен для вычисления крупномасштабных (распределенных) вертикальных электрических токов в шести областях с различной морфологией магнитных полей и различным уровнем вспышечной продуктивности (п. 4.3).

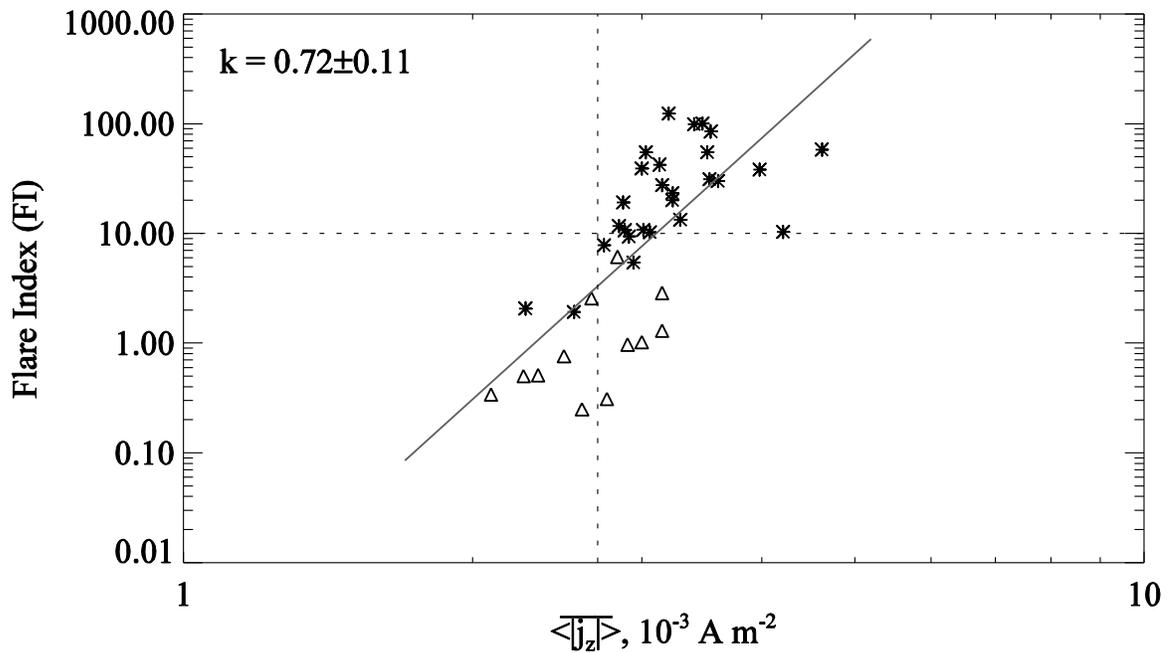


Рис. 2. Корреляционный график между величиной вспышечного индекса (FI, [5]) и усредненной за время нашего мониторинга АО средней беззнаковой плотностью вертикального электрического тока $\langle |j_z| \rangle$ для 39 исследуемых областей. Области с низкой активностью (только вспышки рентгеновских классов C) отмечены на графиках треугольниками, области с высокой активностью (с зафиксированными вспышками рентгеновских классов M и/или X) – звездочками. Вертикальная пунктирная линия отображает «критический» уровень величины $\langle |j_z| \rangle \approx 2.7 \text{ мА м}^{-2}$ (см. текст).

Если проанализировать карту распределения плотности вертикального электрического тока j_z в АО, вычисленного на основе интегрального метода, детально описанного в Главе 3, то будут хорошо заметны локальные электрические токи и вытянутые структуры обоих знаков, которые, по всей видимости, представляют собой проекцию горизонтальных токовых жгутов. Однако более крупных по масштабу токовых структур здесь увидеть не удастся. Для их обнаружения необходимо привлекать косвенные методы. В основе применяемой методики лежит известный физический факт: электрический ток образует вокруг себя вихревое магнитное поле. Следовательно, распределенный по большой площади крупномасштабный вертикальный электрический ток должен проявлять себя через регулярное отклонение поперечного магнитного поля от потенциальности, то есть как организованное вихревое азимутальное магнитное поле. Поэтому можно обнаружить распределенные токи, анализируя отклонение наблюдаемых линий поперечного магнитного поля от соответствующей потенциальной конфигурации.

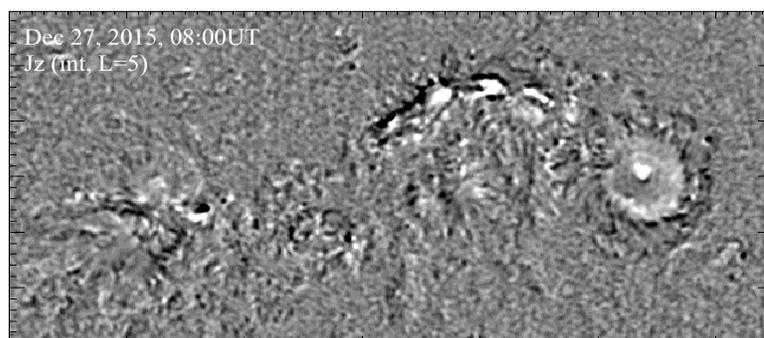


Рис. 3. Пример карты распределения плотности вертикального электрического тока в области NOAA 12473. Карта масштабированы от -0.02 A m^{-2} (черное) в 0.02 A m^{-2} (белое).

Для решения задачи по обнаружению крупномасштабных токовых структур в исследуемых АО были поэтапно выполнены следующие действия (соответствующие этапы отмечены римскими цифрами на Рис. 4):

I. Для каждой векторной магнитограммы рассчитано потенциальное поперечное магнитное поле (синие стрелки на Рис. 4) на основе наблюдаемой компоненты B_z магнитного поля области с использованием IDL-кода CFF1N [15].

II. Вектор наблюдаемого поперечного магнитного поля (красные стрелки на Рис. 4) $\mathbf{B}_t \equiv (B_x, B_y)$ сопоставлен с вектором потенциального поперечного поля.

III. В каждом пикселе магнитограммы вектор наблюдаемого поперечного поля разложен на две составляющие: компоненту, параллельную поперечному потенциальному магнитному полю, и компоненту, ортогональную направлению вектора поперечного потенциального поля $B_{t\perp}$. Последняя (назовем ее непотенциальной составляющей поперечного поля) обусловлена присутствием электрических токов (Рис. 4, зеленые стрелки).

IV. Проанализировано распределение компоненты $B_{t\perp}$ в АО. В окрестности крупных пятен в каждой из исследуемых областей обнаружены регулярные вихревые структуры $B_{t\perp}$, обусловленные наличием крупномасштабных, распределенных на значительной площади, электрических токов. Вокруг пятна очерчивается контур C . Выбор границ контура подчиняется определенным правилам, а именно: 1) внутри контура сохраняется преобладающее направление закрутки вектора $\mathbf{B}_{t\perp}$; 2) вектор $\mathbf{B}_{t\perp}$ с внутренней стороны от границы контура направлен внутрь, образуя угол $\leq 90^\circ$ с направлением на центр пятна, а с внешней наружу (угол $> 90^\circ$ с направлением на центр пятна); 3) граница контура проводится, если на большем расстоянии ввиду слабого непотенциального поперечного поля определить направление вектора $\mathbf{B}_{t\perp}$ не представляется возможным. Контур определяется на первой карте $\mathbf{B}_{t\perp}$, его форма сохраняется неизменной в течение всего интервала наблюдений, а расположение контура фиксируется относительно центра тяжести пятна. Центр тяжести измеряется по магнитограммам B_z компоненты магнитного поля, контур пятна определяется по уровню ± 1000 Гс. Величина распределенного тока I_{distr} рассчитывалась по

соответствующей карте распределения величины плотности вертикального электрического тока в АО как сумма значений вертикального тока во всех пикселах, лежащих внутри контура C , независимо от знака B_z :

$$I_{distr} = \int_S j_z ds \quad (12),$$

где S – площадь, охваченная контуром C (плотности электрического тока в уравнении (12) берутся со знаком). Необходимо отметить, что вертикальная составляющая магнитного поля не относится непосредственно к расчетам I_{distr} , а только косвенно через определение контура C (как граничного условия для расчетов потенциального поля). Знак I_{distr} положителен, когда результирующий ток направлен к наблюдателю, и отрицателен в противоположном случае. Направление и знак величины распределенного электрического тока также может быть выведен из направления вихревой структуры непотенциального поперечного магнитного поля: распределенный электрический ток, направленный в сторону наблюдателя (положительный по знаку), связан с преимущественным направлением закрутки $\mathbf{V}_{t\perp}$ против часовой стрелки.

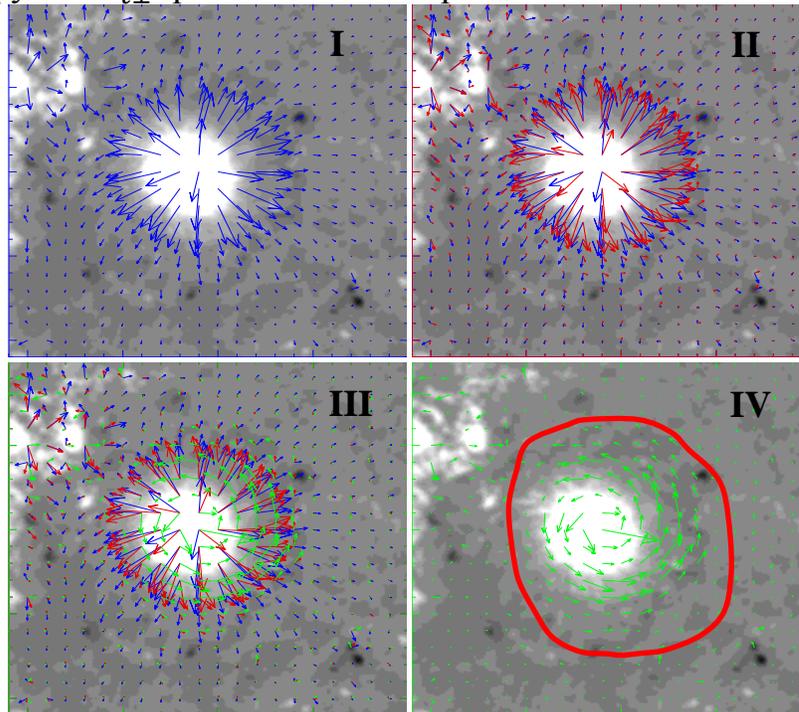


Рис. 4. Этапы обнаружения распределенного тока на примере лидера АО NOAA 12473. Синими стрелками показан вектор потенциального поперечного магнитного поля области, красными стрелками – вектор реального (наблюдаемого) поперечного поля, зелеными стрелками – вектор непотенциальной компоненты поперечного поля $\mathbf{V}_{t\perp}$. Длина стрелок в каждом случае пропорциональна абсолютной величине соответствующего вектора. Красной кривой на рисунке, соответствующем этапу IV, показан контур, внутри которого по карте токов рассчитывается величина распределенного электрического тока I_{distr} .

Показано, что крупномасштабные токовые структуры являются характерными для всех областей, вне зависимости от их морфологии и вспышечной активности. Однако сама величина распределенного тока (I_{distr}), существенно различна для областей с разным уровнем вспышечной продуктивности (п. 4.4). Области с низкой активностью имеют более низкие значения распределенного тока, чем АО с высокой активностью. Обнаружено также, что интервалы повышенной вспышечной активности совпадают по времени с периодами повышения величины I_{distr} .

В п. 4.5 обсуждаются основные результаты, описанные в главе, определяется роль и место наших работ в створе общемировых исследований и определяются дальнейшие перспективы. В п. 4.6 содержатся основные выводы Главы 4.

В **Заключении** представлены основные результаты выполненной диссертационной работы.

Приложение содержит магнитограммы B_z -компоненты магнитного поля, карты распределения плотности вертикального и горизонтального электрического тока, а также графики временных изменений за время нашего мониторинга параметров магнитного поля и электрических токов, а именно: магнитного потока Φ , суммарного беззнакового тока I_{tot} , средней беззнаковой плотности вертикального $\langle |j_z| \rangle$ и горизонтального $\langle |j_{\perp}| \rangle$ тока для 39 АО, анализируемых в рамках исследований, описанных в Главе 3.

ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

На защиту соискателем выносятся следующие положения:

1. На основе адаптированного метода оценки квадрата плотности горизонтального электрического тока в фотосфере АО показано, что вокруг пятен существуют кольцевые горизонтальные токи; плотность горизонтального тока в большинстве АО превышает значения плотности вертикальных токов по крайней мере в 2 раза.

2. Адаптирована методика вычисления локальных вертикальных электрических токов на основе интегральной формы закона Ампера с применением интегрирования по методу Симпсона.

3. Установлена статистическая связь между плотностью локальных вертикальных электрических токов и вспышечной продуктивностью активной области. Коэффициент корреляции 0.72. За 12-20 часов до начала первых вспышек рентгеновских классов М и X в АО наблюдается скачок величины средней беззнаковой плотности локального вертикального электрического тока $\langle |j_z| \rangle$ выше уровня 2.7 mA m^{-2} .

4. Выявлена крупномасштабная вихревая структура непотенциальной составляющей поперечного магнитного поля и связанный с ней крупномасштабный распределенный электрический ток в АО величиной порядка

10¹³ А. Распределенный ток выходит в корону и замыкается внутри АО. В областях повышенной вспышечной активности величина распределенного тока выше и претерпевает более сильные временные изменения. Периоды повышенных значений величины распределенного тока синхронны с периодами повышенной вспышечной активности АО.

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых изданиях:

1. **Fursyak Yu.A.**, Abramenko V.I. Possibilities for estimating horizontal electrical currents in active regions on the Sun // *Astrophysics*. – 2017. – Vol. 60, Issue 4. – P. 544-552.
2. **Фурсяк Ю.А.**, Абраменко В.И. Система глобального тока в активной области // *Изв. Крым. астрофиз. общ.* – 2018. – Т. 114, № 1. – С. 107-111.
3. **Фурсяк Ю.А.**, Абраменко В.И. Возможности оценки горизонтальных электрических токов в фотосфере активной области // *Изв. Крым. астрофиз. общ.* – 2018. – Т. 114, № 1. – С. 141-144.
4. **Fursyak Yu.A.** Vertical Electric Currents in Active Regions: Calculation Methods and Relation to the Flare Index // *Geomagnetism and Aeronomy*. – 2018. – Vol. 58, No. 8. – P. 1129-1135.
5. **Fursyak Yu.A.**, Kutsenko A.S., Abramenko V.I. Distributed electric currents in solar active regions // *Solar Physics*. – 2020. – Vol. 295. – Article id. 19.
6. **Fursyak Yu.A.**, Abramenko V.I., Kutsenko A.S. Dynamics of electric current's parameters in active regions on the Sun and their relation to the Flare Index // *Astrophysics*. – 2020 – Vol. 63, Issue 2. – P. 260-273.

Статьи в сборниках трудов конференций:

1. **Фурсяк Ю.А.**, Абраменко В.И. Возможности оценки горизонтальных электрических токов в фотосфере активной области // *Солнечная и солнечно-земная физика – 2016: 20-я Всероссийская ежегодная конференция с международным участием по физике Солнца: Труды.* – Санкт-Петербург, 2016. – С. 333-336.
2. **Фурсяк Ю.А.**, Абраменко В.И. Вертикальные электрические токи в фотосфере активной области: методика вычислений, структура и динамика // *Солнечная и солнечно-земная физика – 2017: 21-я Всероссийская ежегодная конференция по физике Солнца: Труды.* – Санкт-Петербург, 2017. – С. 353-356.
3. **Фурсяк Ю.А.**, Абраменко В.И., Куценко А.С. Временные изменения параметров электрических токов в активных областях // *Солнечная и солнечно-земная физика – 2018: 22-я Всероссийская ежегодная конференция с*

международным участием по физике Солнца: Труды. – Санкт-Петербург, 2018. – С. 385-388.

4. **Фурсяк Ю.А.**, Абраменко В.И., Куценко А.С. Электрические токи разных пространственных масштабов в активной области: структура, динамика, связь со вспышками // Международная Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике «Физические процессы в космосе и околоземной среде». XVI Конференция молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом». Труды. – Иркутск, 2019. – С. 119-121.

Благодарности

Автор диссертации считает своим долгом поблагодарить научного руководителя и соавтора совместных публикаций, доктора физико-математических наук В.И. Абраменко за ценные советы и дискуссии, а самое главное – за терпение и заботу, которые за последние годы помогли окрепнуть соискателю на стезе науки. Благодарность хотелось высказать коллеге и соавтору ряда совместных публикаций А.С. Куценко за техническую помощь и активные обсуждения полученных результатов, а также бывшим сотрудникам КрАО РАН А.Н. Бабину и А.Н. Коваль за руководство в первые годы работы в обсерватории. Отдельно соискатель благодарит разработчиков и службы технической поддержки космических обсерваторий SDO и Hinode, данные которых составляют ядро исследований, лежащих в основе выполненной диссертации.

Цитируемая литература

1. Абраменко В.И., Гопасюк С.И. Система электрических токов и структура магнитного поля активной области // Изв. Крымск. астрофиз. обс. – 1987. – Т. 76. – С. 147-168.

2. Северный А.Б. Появление вспышек в нейтральных точках магнитного поля Солнца и пинч-эффект // Изв. Крымск. астрофиз. обс. – 1958. – Т. 20. – С. 22-51.

3. Сыроватский С.И. Динамическая диссипация магнитного поля и ускорение частиц // Астрон. журн. – 1966. – Т. 43. – С. 340-355.

4. Abramenko V.I. Relationship between magnetic power spectrum and flare productivity in solar active region // *Astrophys. J.* – 2005. – Vol. 629. – P. 1141-1149.

5. Abramenko V.I. Spectrum of magnetic dissipation and horizontal electric currents in the solar photosphere // eprint arXiv:0806.1547. – 2008.

6. Abramenko V.I., Gopasiuk S.I., Ogir' M.B. Electric currents and H α emission in two active regions on the Sun // *Solar Phys.* – 1991. – Vol. 134. – P. 287-297.

7. Alfvén H., Carlqvist P. Currents in the solar atmosphere and a theory of solar flares // *Solar Phys.* – 1967. – Vol. 1. – P. 220-228.

8. Altyntsev A.T., Krasov V.I., Tomozov V.M. Magnetic field energy dissipation in neutral current sheets // *Solar Phys.* – 1977. – Vol. 55. – P. 69-81.
9. Aschwanden M.J. A Nonlinear force-free magnetic field approximation suitable for fast forward-fitting to coronal loops. III. The free energy // *Solar Phys.* – 2013. – Vol. 287. – P. 369-389.
10. Fleishman G.D., Pevtsov A.A. Electric Currents in the Solar Atmosphere // In: *Electric Currents in Geospace and Beyond*. Ed. by Keiling A., Marghito O., Wheatland M. Am. Geophys. Union, Washington. – 2018. – Vol. 43. – P. 43-66.
11. Ledentsov L.S., Somov B.V. Thermal instability of the reconnecting current layer in solar flares // *Astron. Lett.* – 2016. – Vol. 42. – P. 841-849.
12. Melrose D.B. Neutralized and unneutralized current patterns in the Solar corona // *Astrophys. J.* – 1991. – Vol. 381. – P. 306-312.
13. Musset S., Vilmer N., Bommier V. Hard X-ray emitting energetic electrons and photospheric electric currents // *Astron. Astrophys.* – 2015. – Vol. 580. – Article id. A106.
14. Sakai J.I., de Jager C. Solar flares and collisions between current-carrying loops. Types and mechanisms of solar flares and coronal loop heating // *Space Sci. Rev.* – 1996. – Vol. 77. – P. 1-192.
15. Sakurai T. Green's function methods for potential magnetic fields // *Solar Phys.* – 1982. – Vol. 76. – P. 301-321.
16. Sweet P.A. The neutral point theory of solar flares // In: *Electromagnetic Phenomena in Cosmical Physics. Proceedings from IAU Symposium no. 6.* – London: Cambridge Univ. Press, 1958. – P. 123-134.
17. Toriumi S., Wang H. Flare-productive active regions // *Living Rev. Solar Phys.* – 2019. – Vol. 16. – Article id. 3.
18. Wang J., Shi Z., Wang H., Lue Y. Flares and the magnetic nonpotentiality // *Astrophys. J.* – 1996. – Vol. 456. – P. 861-878.
19. Zaitsev V.V., Khodachenko M.L. Energy release in corona magnetic loops // *Radiophys. Quantum Electron.* – 1997. – Vol. 40. – P. 114-138.
20. Zaitsev V.V., Stepanov A.V. Reviews of topical problems: Coronal magnetic loops // *Physics Uspekhi* – 2008. – Vol. 51 – P. 1123-1160.
21. 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.* – 2020. – Vol. 891. – Article id. 138.