

«УТВЕРЖДАЮ»
Директор Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
Института космических исследований
Российской академии наук (ИКИ РАН)



академик РАН,
д.ф.-м.н. А.А. Петрукович

«27» ФЕВРАЛЯ 2026 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН) на диссертацию Куценко Александра Сергеевича на тему «*Локальные магнитные поля на Солнце*», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.1 – Физика космоса, астрономия

Диссертация Куценко Александра Сергеевича посвящена **актуальной теме** исследования локальных магнитных полей на Солнце. Под локальными подразумеваются магнитные поля, сконцентрированные в активных и эфемерных областях с линейными масштабами порядка десятков Мм или в более мелких структурах, например, вдоль границ супергранул и гранул. Активные и эфемерные области, которым уделено основное внимание в диссертации, представляют собой места выхода в солнечную атмосферу ступков сильных (до нескольких килогаусс) магнитных полей в виде структур, называемых магнитными жгутами, из конвективной зоны, где они изначально образуются. В оптическом континууме активные области наблюдаются на фотосфере в виде групп солнечных пятен, систематическое изучение которых осуществляется с XVII века. С 2010 г. в рецензируемых изданиях опубликовано порядка 10000 работ по теме магнитных полей в активных (преимущественно) и эфемерных областях Солнца. **Актуальность** изучения локальных магнитных полей на Солнце определяется двумя аспектами: 1) фундаментальным и 2) прикладным.

Во-первых, несмотря на общую сложившуюся концепцию и построенные феноменологические и математические модели солнечного магнитного динамо, многие важные особенности этого механизма еще не окончательно определены и не описываются на количественном уровне. В частности, касательно локальных магнитных полей, не ясно, на каких глубинах формируются магнитные жгуты, какова относительная роль эффекта Кориолиса и турбулентных течений при их подъеме, какова структура и динамика электрических токов, связанных с магнитными жгутами и др. Более точное и надежное определение особенностей поведения локальных магнитных полей на Солнце важно для усовершенствования и уточнения моделей динамо.

Во-вторых, все мощные солнечные вспышки и значительная доля корональных выбросов массы (КВМ), являющихся источниками солнечных протонных событий и геомагнитных возмущений – сильных и экстремально-сильных явлений космической погоды, происходят в активных областях. Энергия для генерации этих явлений черпается из энергии магнитного поля в атмосфере Солнца. Измерение и изучение локальных магнитных полей в активных областях и связанных с ними электрических токов позволяет лучше понять физику механизмов, приводящих к этим явлениям, а следовательно, развивать новые подходы и методы их прогнозирования. Это важно в связи развитием космических исследований, увеличением численности и сложности космических аппаратов, различных технологий и отраслей жизнедеятельности человека, подверженных влиянию обозначенных явлений.

В диссертации Куценко Александра Сергеевича получены **новые** сведения, обеспечивающие развитие знаний о локальных магнитных полях на Солнце и имеющие ценность как для фундаментальной науки, так и для прикладных работ по прогнозированию космической погоды.

Структура и содержание диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения. Полный объем диссертации 268 страниц, включая 74 рисунка, 4 таблицы, список цитируемой литературы из 374 наименований.

Во **введении** дается обоснование актуальности проведенного исследования, цель работы и решаемые задачи, показывается новизна и практическая значимость работы, кратко описана методология и методы исследования, сформулированы положения, выносимые на защиту, представлен список всероссийских и международных конференций, на которых докладывались результаты работы, список публикаций автора (единолично и в соавторстве) по теме диссертации, приведена информация о личном вкладе автора, объеме и структуре диссертации.

Первая глава посвящена описанию основ методологии для измерения магнитных полей на поверхности Солнца (на фотосфере, в меньшей степени в

хромосфере и короне) и солнечных оптических инструментов – магнитографов наземного (HSOS) и космического базирования (SDO/HMI, SOHO/MDI), данные которых использованы в работе для исследований. Основное же внимание в **первой главе** уделено описанию нового солнечного спектрополяриметра, который был создан в рамках этой диссертационной работы и установлен на Башенный солнечный телескоп имени академика А.Б. Северного (БСТ-1) в КрАО РАН. Отмечено, что автор руководил разработкой инструмента, работами по его установке и отладке, лично разрабатывал алгоритмы для обработки данных спектрополяриметра, включающие учет темного тока и рассеянного света, коррекцию неоднородности ширины входной щели и различной чувствительности пикселей детектора и др. Представлены сравнения изображений и магнитограмм активных областей, полученные с помощью нового спектрополяриметра БСТ-1 и SDO/HMI, показывающие высокое качество работы разработанного инструмента. Стоит отметить, что этот инструмент, аналогов которому почти нет в нашей стране, должен принести пользу для решения фундаментальных и прикладных задач физики Солнца и космической погоды в будущем. Опыт, полученный в ходе его создания, может использоваться для разработки новых инструментов для измерения магнитных полей на Солнце, включая те, что могут быть установлены на космических аппаратах.

Во **второй главе** исследуются закономерности всплытия магнитного потока в активных областях на Солнце. Для этого были определены различные характеристики, в частности линейная скорость нарастания суммарного беззнакового магнитного потока на этапе появления и роста активной области, а также максимальный суммарный беззнаковый магнитный поток, длительность фазы роста, линейный размер активной области и др. В общей сложности была отобрана и исследована большая выборка из нескольких сотен активных областей в центральной части ($\pm 60^\circ$ от центрального меридиана) солнечного диска с надежными измерениями. Основным результатом **главы 2** является установленная степенная зависимость темпа роста суммарного беззнакового магнитного потока от максимального суммарного беззнакового магнитного потока с показателем степени 0.48 ± 0.02 , т.е. очень близкая к квадратному корню. Продемонстрировано, что такая зависимость может быть описана простой моделью всплытия “когерентной” (или однородной) магнитной трубки (жгута) прямоугольного сечения из-под фотосферы. Также показано, что для всей исследуемой выборки, скорость всплытия (для заданного максимального суммарного магнитного потока) превышает скорость затухания магнитного потока, и показатель степенного спектра затухания отличается от показателя спектра всплытия, т.е., по всей видимости, всплытие и затухание магнитного потока активных областей определяются различными физическими процессами. Другой вопрос, исследованный в этой главе – связь скорости роста суммарного беззнакового магнитного потока со вспышечной продуктивностью активных областей. Делается важный (с практической точки зрения) вывод о том, что высокая скорость нарастания

магнитного потока может быть индикатором будущей повышенной вспышечной продуктивности активной области, однако она не является обязательным условием для возникновения вспышек. Иными словами, требуются дальнейшие поиски конкретных триггерных механизмов солнечных вспышек.

Глава 3 посвящена исследованию угловой скорости вращения локальных магнитных структур на солнечной поверхности (на фотосфере). Исследование выполнено на большой выборке активных (864 шт.) и эфемерных (322 шт.) областей. Использовался метод трассеров. В качестве основных трассеров использовались магнитные диполи, наблюдаемые в активных и эфемерных областях на фотосферных магнитограммах. Также в качестве трассеров рассматривались и группы солнечных пятен, наблюдаемые в интенсивности оптического излучения. Традиционно зависимость угловой скорости трассеров от широты (т.е. скорость дифференциального вращения) аппроксимировалась с помощью формулы Фая. Получен ряд интересных и важных результатов. *Во-первых*, показано, что систематически более быстрое вращение группы пятен по сравнению с фоновой невозмущенной плазмой, помимо физических причин, может быть связано с особенностями измерения их положения и характерной эволюцией групп пятен – более быстрой эволюцией (диссипацией) хвостовых пятен относительно лидирующих. Сделаны оценки степени влияния этого эффекта. В результате чего, аргументировано, что для более корректного измерения скорости вращения целесообразно использовать магнитограммы, а не карты распределения интенсивности излучения. *Во-вторых*, были получены числовые значения коэффициентов формулы Фая и проведено их сравнение со значениями, полученных в других работах с помощью других методов. Сделан вывод о том, что угловая скорость вращения магнитных диполей на фотосфере превышает скорость невозмущенной плазмы, полученной спектроскопическим методом. Общепризнанного объяснения этого эффекта пока нет. *В-третьих*, показано, что угловая скорость вращения активных и эфемерных областей имеет тенденцию к уменьшению при увеличении их максимального суммарного беззнакового магнитного потока, однако явной корреляции между двумя параметрами нет. На этапе всплытия магнитного потока, угловая скорость почти равновероятно для разных областей может показывать увеличение и уменьшение значений, а также сохраняться постоянной. После окончания всплытия магнитного потока скорость вращения практически не изменяется.

В **четвертой главе** представлены расчет и анализ вертикальной компоненты электрического тока и токовой компоненты спиральности в активных областях Солнца. Численные расчеты основаны на измерении компонент вектора магнитного поля на фотосфере. Для расчетов использованы традиционные, опробованные методы. Анализ проведен для подвыборки из 72 активных областей. Показано, что к моменту окончания всплытия магнитного потока правило закрутки силовых линий магнитного поля для полушарий выполняется только в половине случаев. Однако для подвыборки из 21

наиболее долгоживущих активных областей правило полушарий выполнено в 95% случаев. Это указывает на то, что знак усредненной токовой спиральности возникает в активной области на этапе эволюции после окончания фазы всплытия магнитного потока. Другой интересный результат **главы 4** – отсутствие ярко выраженной связи между нормированной скоростью нарастания магнитного потока с величиной скрученности силовых линий – прослеживается лишь слабая тенденция для крупных областей к увеличению скорости роста суммарного беззнакового магнитного потока с ростом скрученности. Еще одним интересным, **новым** результатом является обнаружение резкого краткосрочного (часы) провала на временном профиле наклона “флэтнесс-функции” токовой спиральности за 10-15 часов до начала всплытия магнитного потока в активной области, при отсутствии значимых вариаций в профилях “флэтнесс-функций” продольного и поперечного магнитных полей, в профили интегральной токовой спиральности. Этот результат получен пока только для трех всплывающе-активных областей. Его четкого и надежного объяснения пока нет. Если в дальнейшем этот результат (эффект) будет подтвержден на большой выборке активных областей, он может использоваться для прогнозирования быстрого всплытия магнитного потока – фактора повышенной всплывающей активности.

Пятая глава посвящена анализу вклада локальных магнитных полей в дисбаланс магнитного потока (иными словами, в среднее магнитное поле или магнитное поле Солнце-как-звезды) со всего видимого солнечного диска. Показано, что дисбаланс магнитного потока определяется преимущественно локальными магнитными структурами, суммарная площадь которых не превышает 10% от площади солнечного диска. Такими магнитными структурами являются в основном остатки активных областей, распределенные по поверхности Солнца. Помимо прочего, этот результат открывает возможность для изучения локальных магнитных полей на других звездах солнечного типа без достижения (в настоящее время) углового разрешения, необходимого для непосредственного измерения локальных полей на них. Изучение звездной активности – важная актуальная тематика.

В заключении даны основные выводы проведенных исследований. На основе обобщения полученных результатов кратко излагается предполагаемая автором качественная картина подповерхностной эволюции локальных магнитных полей на Солнце.

Обоснованность и достоверность полученных научных результатов, выводов и заключений

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием наблюдательных данных хорошо зарекомендовавших себя инструментов (SDO/HMI, SOHO/MDI, HSOS), проверенных и опубликованных в печати многочисленными коллективами исследователей по всему миру. Для

обработки наблюдательных данных использованы известные, апробированные и широко применяемые методы.

Все полученные результаты и выводы представлялись на 25 всероссийских и международных конференциях и симпозиумах, включая такие как Всероссийская астрономическая конференция (ВАК), Ежегодная конференция “Физика плазмы в солнечной системе”, проводимая в ИКИ РАН, Всероссийская конференция по физике Солнца “Солнечная и солнечно-земная физика” в ГАО РАН, Европейский симпозиум по солнечной физике, симпозиумы Международного астрономического общества (IAU) и др.

Результаты по теме диссертации опубликованы в 23 печатных изданиях, 20 из которых изданы в журналах, рекомендуемых ВАК, 20 в периодических научных изданиях, индексируемых в базах Web of Science и Scopus (например, 7 из них в MNRAS с квартилем Q1, 9 – в Solar Physics с квартилем Q2).

Часть результатов, выносимых на защиту и опубликованных в рецензируемых изданиях, получена с соавторами. Про это указано в автореферате и диссертации. Личный вклад Куценко Александра Сергеевича обозначен и бесспорен. Важность положений, выносимых на защиту, не вызывает сомнений.

Куценко Александр Сергеевич продемонстрировал серьезные навыки и умения, глубокие знания основ общей физики (в частности оптики, электродинамики), квантовой физики, физики Солнца. Выполненное исследование носит комплексный характер. Оно включает разработку нового сложного оптического инструмента, организацию наблюдений, обработку больших массивов наблюдательных данных наземных и космических обсерваторий с помощью ЭВМ, тщательную интерпретацию результатов на основе анализа обширной выборки тематической литературы.

Замечания по содержанию и оформлению

Диссертационная работа Куценко Александра Сергеевича представляет собой завершенное научное исследование по актуальной тематике. Текст работы написан понятным языком, аккуратно и доходчиво изложен. Диссертация имеет четкую структуру. Автореферат полностью и корректно отражает содержание диссертации.

Существенных замечаний к диссертации Куценко Александра Сергеевича нет. Имеется лишь небольшой перечень незначительных вопросов и замечаний:

1. Во многих местах диссертации (например, на стр. 79, 212) используется термин “когерентность” или “когерентный” в применении к магнитным жгутовым структурам. Однако в работе не удалось найти четкого определения этого термина. Было бы полезным привести определение и применимость этого термина, диапазон

- характерных пространственных и временных масштабов, при которых структура может рассматриваться как когерентная.
2. Не понятно, как определялись точки перегиба кусочных линейных функций в разделах 2.5, 2.6 – автоматически или вручную (на глаз)? Не указана точность определения времени точек перегиба.
 3. Не объяснено, почему практически во всех работах по исследованию зависимости угловой скорости вращения от широты расположения трассера на Солнце используется именно формула Фая (3.1 на стр. 136). Было бы целесообразно обсудить преимущества и недостатки этой функциональной зависимости, физические и методологические мотивы ее широкого применения.
 4. Как отмечено в диссертации, расчет токовой спиральности является некорректной математической задачей, требующей двойного интегрирования (формула 4.15 на стр. 190), при значительных ошибках измерения компонент вектора магнитного поля на фотосфере. Хотелось бы видеть в работе оценку диапазона ошибок определения токовой спиральности. При этом, стоит отметить, что в качестве аргумента, показана высокая корреляция значений токовой спиральности, полученных на основе данных двух независимых инструментов (стр. 192).
 5. Результат об обнаружении возмущений пространственной структуры электрических токов в разделе 4.4 получен на основе анализа только трех активных областей. Этот результат был опубликован в 2018. Возникает вопрос, был ли позднее этот результат подтвержден автором или другими исследователями на более широкой выборке активных областей?
 6. Найдены опечатки на стр. 82, 86, 88, 104, 108, 146, 156, 157, 162, 176, 179, 186, 191, 196, 203, т.е. примерно на 5% текста - вполне приемлемое значение.
 7. Небольшая несогласованность использование термина “диполи” на стр. 93, “биполи” на стр. 117.

Эти замечания не влияют на общую положительную оценку диссертации.

Общее заключение

Диссертация Куценко Александра Сергеевича «*Локальные магнитные поля на Солнце*» представляет собой законченную научно-исследовательскую работу на актуальную тему и удовлетворяет требованиям ВАК. Результаты, полученные в диссертационной работе, вносят существенный вклад в исследование магнитных полей и активности Солнца и могут использоваться в ИКИ РАН, ГАО РАН, ИЗМИРАН, КрАО РАН, ИСЗФ СО РАН, ИПГ, ГАИШ МГУ и других отечественных и зарубежных организациях, где проводятся

работы по исследованию и прогнозированию магнитных полей на Солнце, солнечной активности, солнечно-земных связей и космической погоды.

Диссертация удовлетворяет требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденных Постановлением правительства РФ от 24.09.2013 № 842, а ее автор Куценко Александр Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия.

Отзыв составил старший научный сотрудник
Отдела физики космической плазмы ИКИ РАН,
к.ф.-м.н.

/Зимовец И.В./

Результаты диссертации рассмотрены и одобрены на заседании научно-технического семинара Отдела физики космической плазмы ИКИ РАН (председатель НТС – д.ф.-м.н., академик РАН А.А. Петрукович) 10 ноября 2025 г.

Руководитель Отделом физики
космической плазмы ИКИ РАН,
д.ф.-м.н., академик РАН

/Петрукович А.А./

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН)

Адрес: Россия, 117997, г. Москва, ул. Профсоюзная 84/32

Телефон: +7-495-333-20-88

e-mail: iki@cosmos.ru

Сайт: <https://iki.cosmos.ru/>