

Утверждаю

Директор Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
Ордена Трудового Красного Знамени
«Институт солнечно-земной физики» СО РАН

член-корреспондент РАН Медведев А.В.

18 сентября 2025 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Ордена Трудового Красного Знамени
Институт солнечно-земной физики

Сибирского отделения Российской академии наук

на диссертацию Плотникова Андрея Александровича

«Диссипация магнитного потока в активных областях на Солнце»,

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 1.3.1 - «Физика космоса, астрономия»

Актуальность темы

Актуальность выбранной темы диссертации «Диссипация магнитного потока в активных областях на Солнце» обусловлена растущей потребностью в понимании физических процессов, лежащих в основе экстремальных событий в солнечной атмосфере и в разработке методов прогноза состояния околоземного космического пространства. Активные области (АО) являются ключевым источником вспышек и корональных выбросов массы, которые напрямую влияют на околоземное пространство. Одним из важнейших, но недостаточно изученных этапов жизненного цикла АО является их распад. Именно на завершающем этапе жизни АО происходит диссипация магнитного потока и его перераспределение по солнечной поверхности, что в значительной степени влияет на глобальную эволюцию магнитного поля Солнца и его дальнейшую регенерацию. Количественные характеристики процесса распада магнитного потока АО имеют фундаментальное значение для верификации моделей солнечного динамо, особенно в контексте 11-летнего цикла перестройки магнитного поля Солнца.

Современные наблюдательные методы, включая спектрополяриметрию, векторную магнитометрию и спутниковые измерения с высоким пространственно-временным разрешением, существенно расширяют возможности изучения магнитной структуры АО на этапе их распада. Применение новых методов исследования позволяет не только уточнить ранее установленные эмпирические зависимости, но и обнаружить новые физические эффекты, ранее недоступные для наблюдений.

Диссертационная работа направлена на выявление механизмов диссипации магнитного потока в АО, что представляет собой важную задачу для современной астрофизики. Проведенные исследования обладают высокой актуальностью, поскольку вносят вклад в понимание механизмов солнечного магнетизма и совершенствование моделей солнечной

активности, что имеет прикладное значение для прогноза явлений космической погоды и оценки рисков для космической и наземной инфраструктуры.

Структура и содержание работы

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы, включающего 139 источников. Объем диссертации составляет 111 страниц, включая 40 рисунков и 4 таблицы.

Первая глава охватывает широкий спектр тем, связанных с физическими основами и методами измерения магнитных полей в фотосфере Солнца. Описаны основные подходы к извлечению компонент вектора магнитного поля из спектрополяриметрических данных. Предложен и реализован метод коррекции эффекта насыщения, возникающего при использовании приближения слабого магнитного поля. Разработана и протестирована приближенная оценка модуля вектора магнитного поля по измерениям компонент I и V вектора Стокса, показавшая хорошее согласие с результатами кода инверсии MERLIN. Представлены результаты измерений магнитных полей, выполненные на телескопе БСТ-2 КрАО РАН. Продемонстрировано использование нейросетевых алгоритмов для ускоренного извлечения параметров атмосферы из спектрополяриметрических данных с возможностью оценки их погрешностей.

Вторая глава содержит статистическое исследование диссипации магнитного потока АО на Солнце на основе данных SDO/HMI. Разработан алгоритм автоматического выделения стадии диссипации магнитных потоков и расчета соответствующих параметров. Установлена степенная зависимость между скоростью диссипации и максимальным магнитным потоком АО. Показано, что скорость всплытия магнитного потока АО значительно выше скорости его диссипации, и оба процесса подчиняются разным степенным законам. Выделен кластер униполярных АО, которые демонстрируют аномально низкую скорость диссипации по сравнению с другими типами АО.

Третья глава направлена на исследование возможных физических механизмов медленной диссипации магнитного потока униполярных АО. Обнаружена корреляция между скоростью диссипации магнитного потока и средней плотностью вертикальных электрических токов АО. Также показано, что униполярные АО характеризуются в среднем меньшей плотностью ультрафиолетового излучения, чем другие типы АО. Выявлена корреляция между плотностью ультрафиолетового излучения и скоростью диссипации.

Четвертая глава посвящена анализу диссипации магнитных потоков униполярных АО с использованием модели турбулентной эрозии. Сделана оценка времени диссипации и максимальной площади пятен на основе анализа их периметра и площади. Наблюдения подтвердили, что скорость убывания площади линейно связана с периметром, что согласуется с моделью турбулентной эрозии. Однако результаты показали, что модель не может полностью объяснить аномально низкую скорость диссипации в некоторых АО, а расчетное время их жизни не соответствует наблюдениям.

Научная новизна

Разработаны и применены усовершенствованные методы восстановления параметров магнитного поля, включая быстродействующий метод определения модуля магнитного поля по круговой поляризации и способ компенсации насыщения в приближении слабого поля. Впервые проведено статистическое исследование характеристик магнитного поля на стадии распада 910 АО. Установлена степенная зависимость между максимальным магнитным потоком и скоростью его диссипации, выделен кластер униполярных областей с аномально медленным распадом.

Достоверность полученных результатов

Достоверность результатов, представленных в диссертации, обеспечивается использованием данных наблюдений высокоточных инструментов SDO/HMI и Hinode/SOT/SP, а также корректным применением методов анализа спектрополяриметрических данных. Анализ диссипации магнитного потока АО проведен на основе статистически значимой выборки данных. Подробное описание используемых методов и алгоритмов позволяет воспроизводить расчеты на независимых выборках.

Практическая значимость

В диссертации представлены новые подходы к спектрополяриметрическому анализу, включая быстросействующий метод определения модуля магнитного поля по круговой поляризации, позволяющий снизить требования к оборудованию и ускорить получение исходных данных. Также предложен метод коррекции эффекта насыщения в приближении слабого магнитного поля, который может применяться для обработки как современных, так и архивных данных. Это расширяет возможности анализа данных, полученных с использованием инструментов разного уровня. Найденная степенная зависимость между максимальным магнитным потоком АО и скоростью его изменения представляет собой важный эмпирический критерий, который может быть использован в проверке теоретических моделей.

Замечания к диссертационной работе

1. В разделе 1.9.1 представлены результаты коррекции насыщения магнитного поля в магнитограммах HSOS/SMFT. При этом отсутствует прямая количественная оценка ошибки скорректированных данных, например, в виде среднеквадратического отклонения или доверительных интервалов. Оценка качества коррекции ограничивается анализом диаграмм рассеяния и коэффициентом корреляции Пирсона, что является важным, но не дает полного понимания точности метода. Для повышения убедительности результатов следовало включить численную характеристику погрешности скорректированных магнитных полей.
2. В главе 3 связь скорости диссипации магнитного потока с различными параметрами АО оценивается через коэффициенты корреляции. Однако в диссертации не приведена оценка статистической достоверности этих коэффициентов, что ограничивает понимание, является ли корреляция случайной или отражает реальную физическую зависимость. Интерпретация уровня связи в тексте диссертации раскрыта недостаточно полно. Известно, что критерии для интерпретации коэффициента корреляции не являются универсальными и могут различаться в зависимости от области исследования. Кроме того, уровень корреляции может быть обусловлен влиянием неучтенных в анализе параметров.
3. В выражении (3.4) для крупномасштабного электрического тока суммирование производится по контуру $\square$. Однако выше в тексте сказано, что контур выбирается человеком вручную. Неясно, как оценивалась погрешность, связанная с субъективностью ручного выбора контура, и как эта погрешность влияет на выводы о наличии или отсутствии крупномасштабных токов в АО. Оценивалась ли величина погрешности и степень ее влияние на полученные результаты?

4. В разделе 4.5 описан метод выделения магнитного элемента в униполярной АО. Для определения односвязной области магнитограммы и исключения вклада ошибок измерений поперечного магнитного поля использовался контур порогового магнитного поля $600 \text{ Мкс} \cdot \text{см}^{-2}$. Как показано на рисунке 4.1 диссертации, данный уровень охватывает тень и частично полутень солнечного пятна. В работе Norton et al. (2017) для аналогичной цели применяется порог $575 \text{ Мкс} \cdot \text{см}^{-2}$, который, согласно их рисунку 1, полностью охватывает тень и полутень пятен. Таким образом, использование уровня $600 \text{ Мкс} \cdot \text{см}^{-2}$, охватывающего только часть полутени, требует дополнительного обоснования.
5. Рисунки, иллюстрирующие магнитограммы, доплерограммы и фильтрограммы Солнца, не содержат координатные оси или масштабные линейки, что затрудняет оценку пространственных размеров представленных структур. Нумерация формул предусмотрена только в тех случаях, когда они упоминаются в тексте. Для обеспечения единообразия оформления и удобства навигации полезно делать нумерацию всех формул.
6. В диссертационной работе используется как русские, так и международные обозначения единиц измерения физических величин, например, максвелл «Мкс» и «Мх», максвелл в час «Мкс/ч» и «Мх · h⁻¹», гаусс «Гс» и «G». На рисунке 1.21 в четвертом ряду указано нестандартное обозначение единицы измерения доплеровской скорости «kmpr». В ссылках на зарубежную литературу встречается использование русских букв, например [Norton и др., 2017]. Внутри отдельной научной работы желательно придерживаться одного варианта.
7. Отсутствует расшифровка некоторых сокращений, например, «СКО». Введенные сокращения используются не во всех случаях, параллельно встречаются как полные формы, так и аббревиатуры, например, «активная область» и «АО», «ультрафиолетовый» и «УФ», «угловая секунда» и «''», «градус» и «°», «секунда» и «с». Переключение с одного формата представления информации на другой затрудняет восприятие текста.

Несмотря на отмеченные замечания, диссертационная работа заслуживает высокой оценки. Выявленные недостатки носят частный характер и не затрагивают основные результаты и положения, выносимые на защиту, а также не влияют на достоверность и научную значимость полученных результатов. Работа отличается четкой структурой, лаконичным и ясным изложением. Автор диссертации обладает глубоким пониманием ключевых аспектов применяемых методов исследования, а также возможных физических механизмов, лежащих в основе изучаемых явлений.

Выносимые на защиту положения соответствуют результатам, изложенным в диссертации. Автореферат полностью отражает содержание диссертационной работы. Результаты, представленные в диссертации, опубликованы в 12 научных статьях, 8 из которых опубликованы в ведущих астрофизических журналах, включенных в список ВАК.

Заключение

Диссертация Плотникова Андрея Александровича «Диссипация магнитного потока в активных областях на Солнце» представляет собой завершенную научно-квалификационную работу, которая соответствует всем критериям, установленным пунктами 9–14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» (утверждено постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, с изменениями от 21 апреля 2016 г. № 335 и от 1

октября 2018 г. № 1168), а также действующим требованиям ВАК к кандидатским диссертациям. Автор диссертации несомненно заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1 – «Физика космоса, астрономия».

Отзыв ведущей организации рассмотрен и одобрен на семинаре отдела 4 ИСЗФ СО РАН 22 августа 2025 г.

Отзыв подготовил кандидат физико-математических наук заведующий лабораторией экспериментальной физики Солнца и астрофизического приборостроения ИСЗФ СО РАН Колобов Дмитрий Юрьевич. Диссертация защищена по специальности 01.03.03 – Физика Солнца. Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ордена Трудового Красного Знамени Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук.

Адрес: 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 126А, а/я 291

Телефон: +79148880079

E-mail: kolobov@iszf.irk.ru

 Колобов Д.Ю.

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ордена Трудового Красного Знамени Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук.

Адрес: 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 126А, а/я 291

Телефон: +7 (3952) 428265

E-mail: uzal@iszf.irk.ru

Сайт: <https://iszf.irk.ru/>

*Подпись Колобова Д.Ю. заверено:
уч. секр.  Салахутдинов С.С.*

