

На правах рукописи



Плотников Андрей Александрович

**Диссипация магнитного потока в активных
областях на Солнце**

Специальность 1.3.1 —
«Физика космоса, астрономия»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

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

Научный руководитель:

Куценко Александр Сергеевич,
кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Крымская астрофизическая обсерватория РАН, ведущий научный сотрудник

Официальные оппоненты:

Золотова Надежда Валерьевна,
доктор физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет», доцент

Зимовец Иван Викторович,
кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук, старший научный сотрудник

Ведущая организация:

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

Защита состоится 07 ноября 2025 г. в 12 час. 45 мин. на заседании диссертационного совета 24.1.021.01 при Главной (Пулковской) астрономической обсерватории Российской академии наук по адресу: 196140, Санкт-Петербург, Пулковское шоссе, д.65, корп. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ГАО РАН https://www.gaoran.ru/wp-content/uploads/2025/06/Dissertation_Plotnikov.pdf

Автореферат разослан 25 сентября 2025 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.1.021.01,
к.ф.-м.н.



Осипова Александра Анатольевна

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Солнце и его активность играют заметную роль в нашей жизнедеятельности. Даже малые (по сравнению с полной энергией излучения) проявления активности Солнца оказывают существенное влияние на состояние околоземного космического пространства. Хотя жизнь на Земле хорошо защищена магнитным полем и атмосферой самой Земли, возмущения космической погоды — геомагнитные бури — способны привести к нарушению работы космических аппаратов, систем связи и энергетической инфраструктуры. Развитие технологий ведет к тому, что космические спутники широко используются не только в специальных целях (разведка, научные исследования и т.п.), но и в повседневной жизни (к примеру, спутниковая навигация). В последние годы набирает широкое распространение использование спутниковой глобальной сети для передачи данных, что обеспечивается группировками из тысяч небольших космических аппаратов.

Основное влияние на космическую погоду оказывают нестационарные процессы на Солнце: вспышки, корональные выбросы массы, потоки высокоэнергетических частиц. Корональные выбросы массы уносят в межпланетное пространство магнитное поле, которое взаимодействует с собственным магнитным полем Земли. Резкие изменения геомагнитного поля являются причиной возникновения геомагнитно-индуцированных токов, влияние которых необходимо учитывать при разработке систем передачи и генерации энергии в приполярных областях. Высокоскоростные частицы приводят к ионосферным возмущениям, вызывая нарушения в распространении радиоволн и соответствующие сбои в работе систем связи и навигации, радиолокации, а также могут приводить к выходу из строя электронных узлов космических аппаратов. Таким образом, с каждым годом все более остро стоит потребность в исследовании околоземного космического пространства и изучении влияющих на него факторов, что необходимо для прогнозирования его состояния. Понимание причин экстремальных событий на Солнце является решающим для построения такого прогноза.

Вся активность Солнца определяется его магнитным полем. Магнитное поле генерируется в результате работы механизма глобального динамо в конвективной оболочке звезды, хотя точные детали этого процесса вызывают дебаты. Наиболее явным проявлением глобального динамо являются группы пятен на поверхности звезды. Продолжительные наблюдения показывают, что активность Солнца циклична и количество наблюдаемых групп пятен меняется со средним периодом около 11 лет. Если рассматривать первопричину пятен — локальные концентрации магнитного поля (или активные области), то, с учетом смены знака полярности ведущих и хвостовых частей магнитных диполей, магнитный цикл Солнца составляет около 22 лет.

Наблюдения показывают, что в минимумах активности глобальное магнитное поле представлено полоидальной компонентой, когда магнитное поле одного знака сконцентрировано на одном полюсе, а второго — на противоположном. В ходе солнечного цикла полоидальное поле переходит в тороидальное. Предполагается, что активные области являются результатом появления жгутов тороидального магнитного поля на поверхности, а в последующем происходит трансформация тороидального поля в полоидальное с направлением, противоположным исходному [Babcock, 1961; Leighton, 1964; 1969; Parker, 1975; Charbonneau, 2020].

Наиболее вероятным механизмом перехода из полоидальной в тороидальную форму является дифференциальное вращение (т.н. омега-механизм). Касательно механизма обратного процесса (перехода из тороидальной в полоидальную форму) ведутся обширные дискуссии. Часто предполагается, что полоидальная компонента магнитного поля возникает вследствие преимущественно упорядоченной ориентации активных областей: ведущая полярность обычно располагается ближе к экватору, чем хвостовая. Возникающие в активных областях ненулевые составляющие полоидального магнитного поля переносятся к полюсам меридиональными течениями, постепенно заменяя глобальное полоидальное магнитное поле на поле противоположного знака по отношению к исходному. Важно отметить, что, согласно наблюдениям, происходит перенос не крупных магнитных когерентных структур, а небольших магнитных элементов, возникающих в процессе диссипации активных областей. В данном контексте под понятием диссипации подразумевается не только переход энергии в тепловую форму, а общий процесс распада (фрагментации) той локальной концентрации магнитного поля, которой является активная область.

Таким образом, процесс диссипации активных областей является полноценным элементом в цепочке трансформации магнитного поля в ходе цикла солнечной активности. Мелкомасштабные структуры, возникающие в ходе распада активной области, играют немаловажную роль в процессе генерации полоидальной компоненты магнитного поля и зарождении последующего солнечного цикла. Следовательно, изучение процессов, регулирующих диссипацию активных областей, необходимо для понимания природы солнечной активности в целом и разработки методов ее долгосрочного прогноза.

Целью данной работы является выявление механизмов диссипации магнитного потока в активных областях, что включает в себя решение нескольких **задач**:

1. Корректное определение магнитных полей по измеренным параметрам Стокса.
2. Статистический анализ скорости диссипации магнитного потока в активных областях, выявление закономерностей для активных областей различной магнито-морфологической конфигурации.

3. Поиск различных механизмов диссипации магнитного потока выявленного подкласса униполярных активных областей с медленной диссипацией: сопоставление скорости диссипации с УФ излучением и электрическими токами.
4. Проверка применимости модели турбулентной эрозии в диссипации магнитного потока в униполярных активных областях с медленной диссипацией.

Научная новизна. За время изучения и моделирования солнечной активности было опубликовано немало работ, изучающих процесс распада активных областей с теоретической и статистической точек зрения. При этом предыдущие исследования были сфокусированы на динамике изменения площадей пятен, что было обусловлено наблюдательными возможностями. Ввиду того, что активные области имеют в первую очередь магнитную природу, магнитный поток является первоопределяющей величиной, характеризующей развитие активной области, в то время как пятна являются лишь следствием подавления конвекции в фотосфере сильными магнитными полями активной области. Статистические исследования магнитных полей стали возможны сравнительно недавно с появлением большого количества инструментов для спектрополяриметрии Солнца, проводящих непрерывные наблюдения. Количество статистических исследований диссипации магнитного потока в активных областях незначительно по сравнению с работами, в которых анализировалось изменение площади пятен. Например, выборка в работе [Norton и др., 2017], исследовавшей диссипацию магнитного потока в активных областях, ограничена лишь 10 случаями. В другой подобной работе [Ugarte-Urra и др., 2015] выборка также невелика. Основным отличием диссертационной работы является впервые проведенное исследование характеристик именно магнитного поля нескольких сотен диссипирующих активных областей, что позволило более надежно установить основные закономерности процесса распада.

Практическая значимость. Получение величины напряженности магнитного поля на основе зеемановского расщепления спектральных линий известно давно. Тем не менее, обновление методов измерения магнитного поля является крайне актуальным в наше время ввиду развития инструментов для регистрации солнечных спектров с высоким пространственным и спектральным разрешением. В то же время полноценный анализ профилей спектральных линий все еще остается вычислительно затратной задачей, поэтому не теряют своей актуальности и упрощенные методы получения параметров солнечной атмосферы. Представленный метод получения модуля магнитного поля демонстрирует высокое быстродействие. Стоит отметить, что для такого метода достаточно регистрации только круговых компонент поляризации солнечного излучения, что существенно снижает требования к

применяемому для измерений оборудованию. Также метод позволяет быстро получать начальные приближения для последующего анализа профиля спектральной линии более точными методами.

Предложенный способ устранения насыщения в приближении слабого магнитного поля позволяет уточнить данные, полученные магнитографами на основе узкополосного спектрального фильтра, и, что немаловажно, не требует изменения самой методики регистрации солнечного изображения, т.е. может быть применен в том числе и к историческим данным.

Установленная степенная зависимость между максимальным магнитным потоком активной области и скоростью изменения ее магнитного потока может быть использована для проверки теоретических оценок процесса диссипации магнитного потока.

Выявленное подмножество медленно диссипирующих униполярных активных областей демонстрирует заметное отклонение от общей зависимости. Понимание причин такого поведения поможет ответить на вопросы о диссипации магнитного потока в фотосфере и подфотосферной динамике магнитных жгутов. Кроме того, наблюдения показывают, что в непосредственной близости от униполярной активной области (к примеру, активных областей NOAA 12673 и 10930) нередко происходит всплытие очень сложной магнитной структуры, приводящей в дальнейшем к сильным вспышкам. По этой причине исследование эволюции униполярных активных областей в перспективе может использоваться в прогностических целях.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Предложен метод для корректной оценки сильных магнитных полей в рамках приближения слабого магнитного поля.
2. Установлено, что большая часть активных областей подчиняется степенной зависимости между пиковым магнитным потоком и скоростью потери магнитного потока. В то же время выделен кластер униполярных активных областей, демонстрирующих скорость потери потока значительно меньшую, чем ожидаемая из степенной зависимости.
3. Показано, что униполярные активные области в среднем генерируют меньшую плотность ультрафиолетового излучения (в 2.13 раз). Удельная интенсивность ультрафиолетового излучения, приходящаяся на единицу магнитного потока, связана со скоростью диссипации потока в активной области (коэффициент корреляции между логарифмами величин составляет 0.54).
4. Установлено, что механизм турбулентной эрозии не всегда адекватно описывает реально наблюдаемую скорость диссипации магнитного потока активной области. По-видимому, требуется учет дополнительных механизмов диссипации или нелинейных процессов в самой модели.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на следующих конференциях:

- Всероссийская ежегодная конференция «Солнечная и солнечно-земная физика» (Санкт-Петербург, Россия, 2018, 2019, 2020, 2023; Устные доклады)
- Конференция молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом» в рамках Международной Байкальской молодежной научной школы по фундаментальной физике «Физические процессы в космосе и околоземной среде» (Иркутск, Россия, 2019, 2022; Устные доклады)
- Всероссийская ежегодная конференция «Физика плазмы в солнечной системе», (Москва, Россия, 2019, 2021, 2022, 2023, 2024; Устные доклады, 2020; Стендовый доклад)
- Международная конференция 5th Asia Pacific Solar Physics Meeting, IUSAA, (Pune, India, 2020; Стендовый доклад)
- Международная конференция IAU Symposium 365 «Dynamics of Solar and Stellar Convection Zones and Atmospheres», (Yerevan, Armenia, 2023; Устный доклад)
- Международная конференция 16th European Solar Physics Meeting (Rome, Italy, 2021; Стендовый доклад)
- Всероссийская ежегодная конференция «Магнетизм и активность Солнца», КраО РАН, (Научный, Россия 2018, 2019, 2021, 2022, 2023, 2024; Устные доклады)
- Всероссийская конференция «Современные инструменты и методы в астрономии», САО РАН, 2023 (Устный доклад)

Личный вклад. Автор принимал активное участие в подготовке задач, разработке методики обработки данных, обсуждении и интерпретации результатов, подготовке совместных публикаций. Автор проделал основную работу по созданию программного обеспечения, применявшегося для обработки и последующего анализа данных, используемых в диссертации.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 12 печатных изданиях, 8 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, 8 — в периодических научных журналах, индексируемых Web of Science и Scopus.

Публикации по результатам работы в журналах, рекомендуемых ВАК

1. *Fursyak Y. A., Plotnikov A. A.* Electric Current Systems in Active Regions at a Late Stage of Evolution and Their Role in the Processes of Stabilization/Destabilization of Sunspots // *Astrophysics*. – 2022. – Sep. – Vol. 65, no. 3. – P. 384–403.
2. *Kutsenko A. S., Abramenko V. I., Plotnikov A. A.* A Statistical Study of Magnetic Flux Emergence in Solar Active Regions Prior to Strongest

- Flares // *Research in Astronomy and Astrophysics*. – 2024. – Apr. – Vol. 24, no. 4. – P. 045014.
3. *Mistryukova, L., Plotnikov, A., Khizhik, A., Knyazeva, I., Hushchyn, M., Derkach, D.* Stokes Inversion Techniques with Neural Networks: Analysis of Uncertainty in Parameter Estimation // *Sol. Phys.* – 2023. – Aug. – V. 298, no. 8. – P. 98.
 4. *Plotnikov A., Abramenko V., Kutsenko A.* Estimation of the Lifetime of Slow Decaying Unipolar Active Regions in the Framework of the Turbulent Erosion Model // *Sol. Phys.* – 2024. – Mar. – V. 299, no. 3. – P. 34.
 5. *Plotnikov, A., Kutsenko, A., Yang, S., Xu, H., Bai, X., Zhang, H., Kuzanyan, K.* Improvements of the Longitudinal Magnetic Field Measurement from the Solar Magnetic Field Telescope at the Huairou Solar Observing Station // *Sol. Phys.* – 2021. – Nov. – V. 296, no. 11. – P. 165.
 6. *Plotnikov A. A., Abramenko V. I., Kutsenko A. S.* Statistical analysis of the total magnetic flux decay rate in solar active regions // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* – 2023a. – May. – V. 521, no. 2. – P. 2187–2195.
 7. *Plotnikov A. A., Abramenko V. I., Kutsenko A. S.* Correction to: 'Statistical analysis of the total magnetic flux decay rate in solar active regions' // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* – 2023b. – Jun. – V. 521, no. 4. – P. 6293–6294.
 8. *Xu, H.-Q., Liu, S., Su, J.-T., Deng, Y.-Y., Plotnikov, A., Bai, X.-Y., Chen, J., Yang, X., Guo, J.-J., Wang, X.-F., Song, Y.-L.* Automatic detection and correction algorithms for magnetic saturation in the SMFT/HSOS longitudinal magnetograms // *Research in Astronomy and Astrophysics*. – 2021. – Apr. – V. 21, no. 3. – P. 067.

Прочие публикации

9. *Plotnikov A. A., Kutsenko A. S.* On the possibility of deriving the absolute value of magnetic field vector from Stokes I and V // *Astronomical and Astrophysical Transactions*. – 2019. – Jan. – V. 31, no. 3. – P. 351–362.
10. *Плотников А. А.* Ультрафиолетовое излучение униполярных активных областей и связь его интенсивности со скоростью потери магнитного потока // *Известия Крымской астрофизической обсерватории*. – 2024. – Т. 120, № 3. – С. 5–11.
11. *Плотников А. А., Куценко А. С.* Оценка величины модуля вектора магнитного поля из I и V компонент вектора Стокса // *Известия Крымской астрофизической обсерватории*. – 2018. – Т. 114, № 2. – С. 87–96.

12. Плотников А. А., Куценко А. С., Семенов Д.Г., Суница Г.А. Эксперимент по получению карт магнитного поля с помощью спектрографа БСТ-2 КрАО РАН // Известия Крымской астрофизической обсерватории. – 2024. – Т. 120, № 2. – С. 21–29.

Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, формулируется цель, ставятся задачи работы, излагается научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

Первая глава посвящена описанию методов, используемых для измерения магнитных полей в солнечной фотосфере.

В первых трех параграфах главы описываются формализм параметров Стокса, применяемый для описания поляризационного состояния излучения, процесс образования спектра солнечной фотосферы и эффект Зеемана, используемый для измерения магнитных полей в астрофизике.

В параграфах 1.4 – 1.7 приводится описание различных методов получения компонент вектора магнитного поля из наблюдаемого спектра. Рассмотрены также ограничения, сопутствующие каждому из методов.

Параграф 1.8 посвящен описанию некоторых телескопов, выполняющих измерения магнитных полей, данные которых применялись в диссертационной работе. Для наблюдательных инструментов приведены их технические характеристики и описаны предоставляемые ими результаты наблюдений.

В последующих параграфах приведены результаты применения методов получения магнитных полей к данным реальных наблюдений. В параграфе 1.9.1 предложен метод устранения насыщения, возникающего при применении приближения слабого магнитного поля. Метод применен для данных телескопа HSOS/SMFT (рис. 1) и успешно компенсирует возникающее насыщение.

В параграфе 1.9.2 приводится пример применения предлагаемых в диссертационной работе приближенных методов получения модуля магнитного поля и его продольной компоненты и сравнение результатов с полноценным решением обратной задачи по данным инструмента Hinode/SOT/SP. Методы показывают хорошую степень согласия, являясь при этом значительно более быстросредействующими.

В параграфе 1.9.3 описан опыт проведения спектральных измерений на телескопе БСТ-2 КрАО РАН с помощью ПЗС-матрицы с последующей их обработкой методом решения обратной задачи спектрополяриметрии. Сравнение с данными космического инструмента SDO/HMI показывает приемлемое

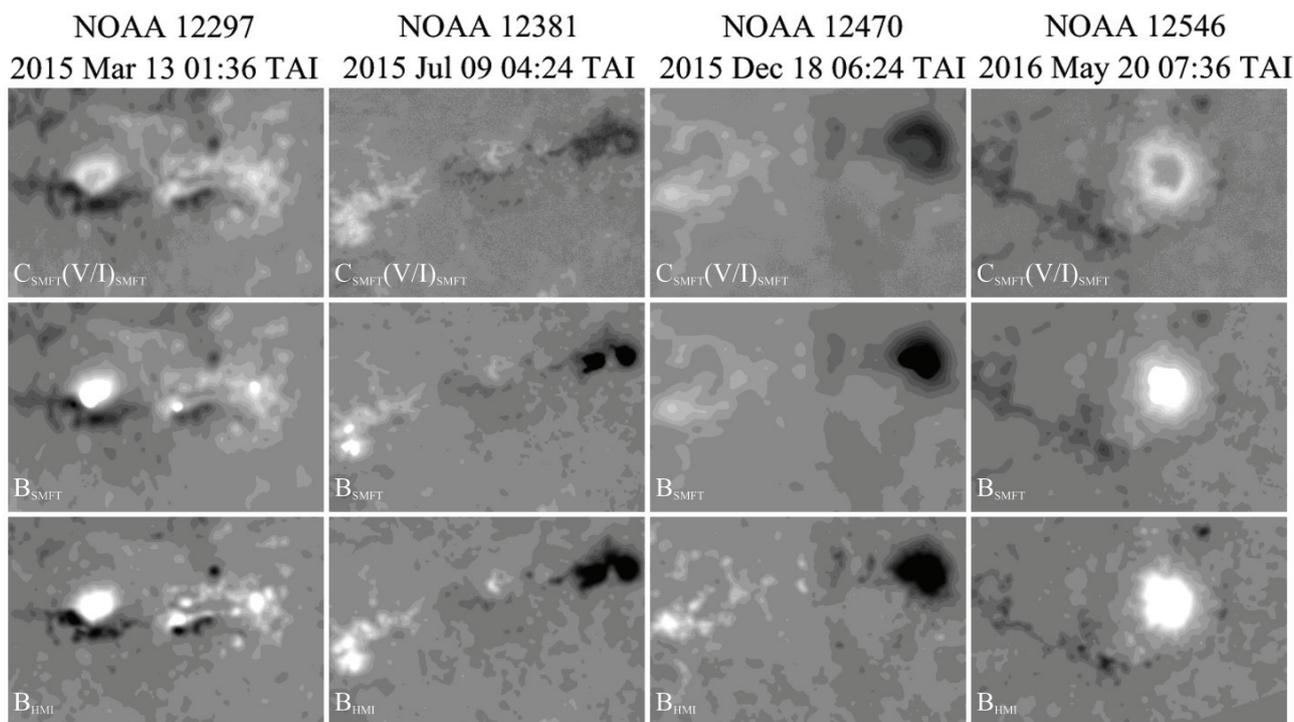


Рисунок 1 — Пример устранения насыщения для четырех различных активных областей. Первый ряд — карты продольной компоненты магнитного поля, полученные в приближении слабого магнитного поля. Второй ряд — карты продольной компоненты магнитного поля, полученные по данным SMFT методом устранения насыщения. Третий ряд — карты продольной компоненты магнитного поля, полученные по данным SDO/HMI с помощью кода инверсии VFISV.

качественное и количественное согласие. Дополнительно рассмотрены инструментальные факторы, влияющие на точность измерений.

В параграфе 1.9.4 рассказывается об обучении и использовании нейронных сетей для решения обратной задачи спектрополяриметрии и применении их к наблюдениям инструмента Hinode/SOT/SP. Нейронные сети показывают значительный выигрыш в скорости обработки данных. Отличительной особенностью предложенной архитектуры является возможность оценки погрешности полученных значений параметров солнечной атмосферы.

Вторая глава посвящена статистическому анализу диссипации полного беззнакового магнитного потока в активных областях (АО).

Параграф 2.1 представляет собой краткое описание исторических исследований процесса диссипации АО и полученных в их рамках результатов. Важно отметить, что большая часть упомянутых исследований опиралась на величину площади групп пятен, входящих в АО. В диссертационной работе, в свою очередь, проводился анализ величины полного беззнакового магнитного потока.

В параграфе 2.2 описана морфологическая классификация АО, применявшаяся в диссертационной работе.

В параграфе 2.3 описаны использованные в анализе данные (применялись магнитограммы SDO/HMI с 2010 по 2017 годы), способы выделения АО и вычисления радиальной компоненты магнитного поля.

Для каждой АО были получены зависимости вида «время — магнитный поток». Чтобы статистически исследовать процесс диссипации, для каждой АО выделялся отрезок времени, соответствующий диссипации. Для минимизации влияния человеческого фактора фаза диссипации выделялась автоматически с помощью алгоритма, описанного в параграфе 2.3.2.

Всего были выбраны 1177 АО, для 910 из которых была выделена фаза диссипации. Величина магнитного потока, наблюдавшаяся в начальный момент фазы диссипации, принималась в качестве максимальной величины магнитного потока. Для некоторых АО момент пикового развития (пиковой величины магнитного потока) происходил до начала наблюдений. Указанная для них максимальная величина магнитного потока будет недооценена, т.к. реальный пик развития данных АО не наблюдался. Такие АО («АО без наблюдаемого пика») выделены в отдельную подгруппу. Соответственно, оставшиеся АО образуют подгруппу «АО с наблюдавшимся пиком», в которую вошли 718 АО.

В параграфе 2.4 рассмотрена зависимость между скоростью диссипации магнитного потока и максимальным магнитным потоком для «АО с наблюдавшимся пиком». Диаграмма рассеяния для этих величин показана на рис. 2. Зависимость между этими величинами может быть аппроксимирована степенной функцией. При выражении величины скорости диссипации DR в Мкс/ч, а максимального магнитного потока Φ_{max} — в Мкс и подстановке численных значений, зависимость имеет вид:

$$DR = 1.50 \cdot 10^4 \Phi_{max}^{0.70}$$

Также в параграфе 2.4 рассмотрен процесс диссипации биполярных АО отдельно для лидирующей и хвостовой полярностей. Показано, что в пределах погрешности их диссипация описывается одним степенным законом. Проведено сравнение скорости диссипации со скоростью всплытия, проанализированной в работе [Kutsenko, Abramenko, Pevtsov, 2019]. Показано, что скорость всплытия для всех АО существенно превышает скорость диссипации, однако подчиняется другому степенному закону, что говорит о различии механизмов, регулирующих два этих процесса.

В параграфе 2.5 к рассмотрению добавлены «АО без наблюдаемого пика». Диаграмма рассеяния «максимальный магнитный поток — скорость диссипации магнитного потока» показана на рис. 3 (коричневыми кружками выделены униполярные АО). Заметен кластер АО, демонстрирующих аномально низкую скорость диссипации. Максимальный магнитный поток этих АО лежит в диапазоне $2 - 8 \cdot 10^{21}$ Мкс. Все АО в кластере являются униполярными. В параграфе 2.5 также рассмотрена диссипация рекуррентных

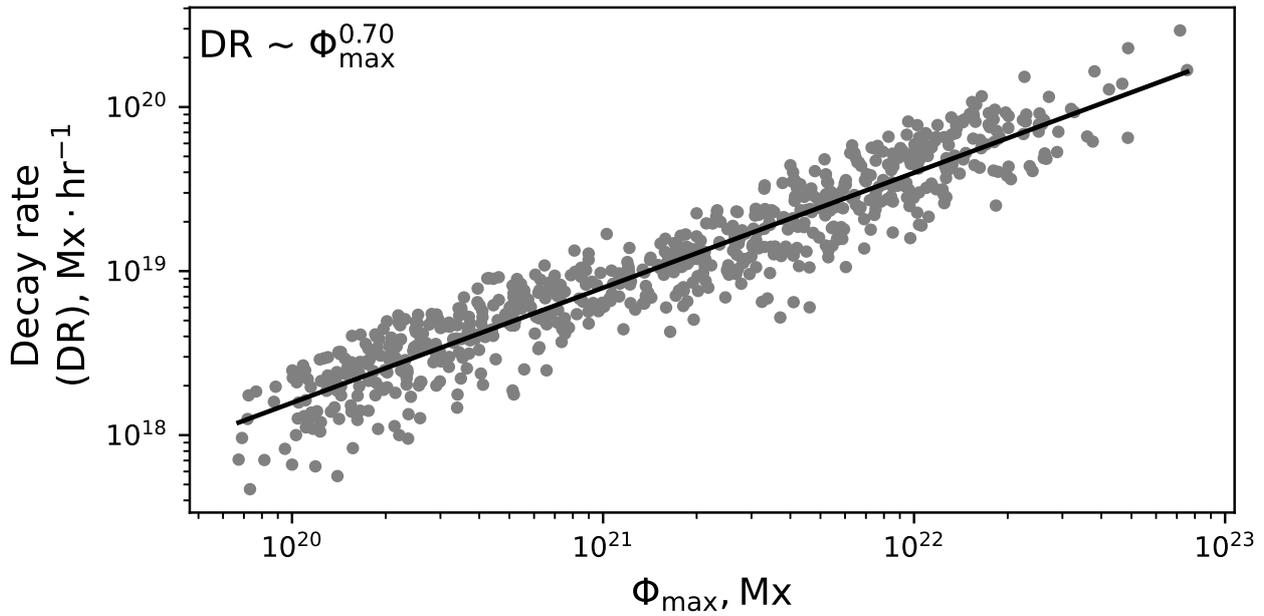


Рисунок 2 — Распределение «максимальный магнитный поток — скорость диссипации магнитного потока» для выборки АО с наблюдаемым пиком. Черной линией показана линейная регрессия в логарифмических координатах.

остатков крупных АО. Показано, что максимальное значение магнитного потока не может являться единственной величиной, характеризующей продолжительность существования АО.

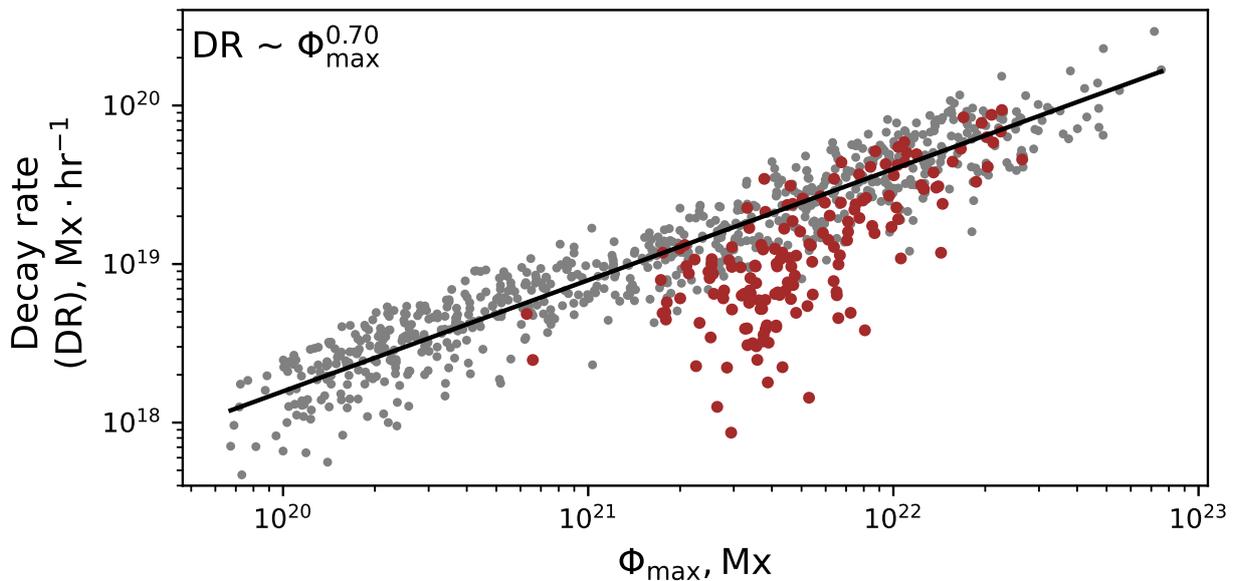


Рисунок 3 — Распределение «максимальный магнитный поток — скорость диссипации магнитного потока» для всех анализируемых АО. Черной линией показана линейная регрессия по данным рис. 2. Коричневыми кружками выделены униполярные АО, серыми — АО остальных классов.

Третья глава посвящена изучению возможной связи между скоростью диссипации и другими величинами с целью поиска причин медленной диссипации некоторых униполярных АО.

В параграфе 3.1 проанализированы локальные и крупномасштабные электрические токи в АО. Вычисление этих величин производилось по данным инструмента SDO/HMI. В параграфе 3.1.1 описаны алгоритмы вычисления плотности вертикального электрического тока и величины крупномасштабного (распределенного по пятну и его окрестности) электрического тока. В параграфе 3.1.2 на основании выборки из 46 АО рассмотрена взаимосвязь величин электрических токов со скоростью диссипации магнитного потока в АО. Показано, что усредненная по времени средняя плотность вертикального электрического тока коррелирует ($r = 0.56$) со скоростью диссипации.

Зависимость между величиной крупномасштабного распределенного электрического тока и скоростью диссипации магнитного потока показана на рис. 4. Для ряда АО величина крупномасштабного электрического тока даже с учетом ошибок вычисления является ненулевой, при этом все такие АО демонстрируют скорость диссипации ниже $1.25 \cdot 10^{19}$ Мкс/ч. Таким образом, можно предположить, что крупномасштабный электрический ток может являться одним из механизмов, обеспечивающих стабилизацию АО. В то же время, он не может являться единственным механизмом, т.к. наблюдались и АО, в которых низкая скорость диссипации не сопровождалась существованием крупномасштабного тока.

В параграфе 3.2 рассмотрена плотность УФ-излучения над пятнами АО по данным инструментов SDO/HMI и SDO/AIA. Показано, что для униполярных АО эта величина оказывается в среднем ниже, чем для АО остальных классов. Причиной этого может являться более вертикальная ориентация магнитных силовых линий (по отношению к поверхности) в униполярных АО. При этом плотность УФ-излучения в униполярных АО возрастает с ростом магнитного потока, в то время как для АО остальных классов она практически не зависит от магнитного потока.

Также рассмотрена взаимосвязь между средней (по времени) плотностью УФ-излучения и скоростью диссипации магнитного потока в АО. Между логарифмами этих величин присутствует некоторая корреляция ($r = 0.54$), однако она обусловлена скорее различиями в средних значениях для униполярных АО (показаны коричневыми кружками) и АО остальных классов (рис. 5).

В **четвертой главе** приведен анализ диссипации униполярных активных областей в рамках модели турбулентной эрозии с целью оценки времени их существования.

Глава начинается с описания нескольких предлагавшихся в различное время механизмов, описывающих диссипацию магнитного потока в АО. Так,

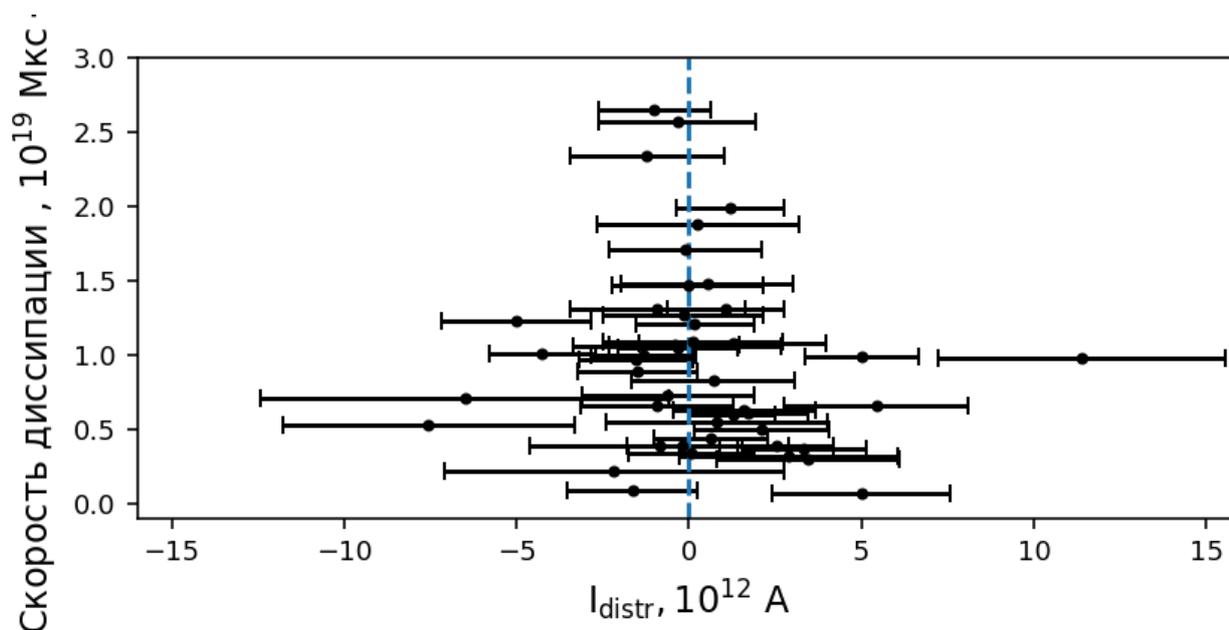


Рисунок 4 — Диаграмма рассеяния между усредненной по времени величиной крупномасштабного электрического тока и скоростью диссипации магнитного потока. Вертикальная штриховая линия соответствует нулевому значению крупномасштабного электрического тока.

параграф 4.1.1 посвящен описанию модели омической диссипации, предложенной в работе [Gokhale, Zwaan, 1972]. В параграфе 4.1.2 описывается механизм турбулентной диффузии, рассмотренный в работах [Meurer и др., 1974] и [Krause, Rüdiger, 1975]. Наконец, в параграфе 4.1.3 рассмотрен механизм турбулентной эрозии, предложенный в работе [Petrovay, Moreno-Insertis, 1997].

В параграфе 4.2 модель турбулентной эрозии описана более подробно, упомянуты выводы модели, использовавшиеся в диссертационной работе. Так, в рамках модели скорость уменьшения площади магнитной трубки, соответствующей АО, должна убывать по мере ее диссипации. Таким образом, разная скорость диссипации у двух одинаковых (по площади) пятен (или соответствующих униполярных АО) может объясняться тем, что одно пятно находится в фазе диссипации достаточно давно, а второе только начало терять свой магнитный поток.

В диссертационной работе была проведена попытка обосновать наличие медленно диссипирующих АО (показанных в параграфе 2.5) с точки зрения их длительного пребывания в фазе диссипации. Другим предположением модели является зависимость скорости диссипации от начального размера магнитной трубки. Такое соотношение делает возможным оценку максимального (на момент начала фазы диссипации) радиуса магнитной трубки, соответствующей диссипирующей АО. Описание соответствующего метода приведено в параграфе 4.4.

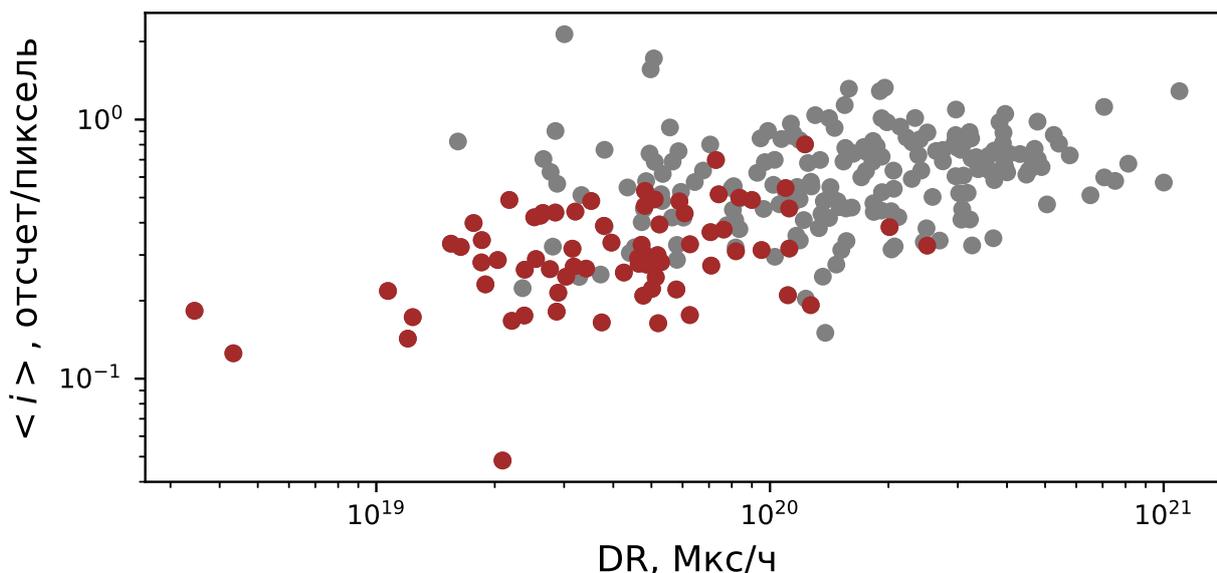


Рисунок 5 — Диаграмма рассеяния между средней плотностью УФ-излучения и скоростью диссипации магнитного потока. Одна точка соответствует одной АО. Коричневым цветом показаны униполярные АО, серым цветом — АО остальных классов.

В параграфе 4.5 описана выборка использовавшихся данных и процесс их обработки. Для анализа были выбраны шесть униполярных АО, наблюдавшихся SDO/HMI.

В параграфе 4.6 приводятся результаты оценки максимального размера и продолжительности диссипации проанализированных униполярных АО. Показано, что в некоторых случаях оценка продолжительности существования АО получается неадекватно высокой. К примеру, АО NOAA 12246 должна была диссипировать более двух лет, чтобы иметь столь низкую скорость диссипации в рамках модели турбулентной эрозии. Таким образом, модель турбулентной эрозии без дальнейших модификаций (учета дополнительных параметров) не может объяснить наблюдаемые характеристики диссипирующих униполярных АО.

Заключение. Основной целью исследования являлся анализ процесса диссипации магнитного потока в АО. Вместо площадей солнечных пятен, представляющих собой прокси-величину для магнитного потока АО, использовались карты вектора магнитного поля с высоким пространственным разрешением для непосредственного вычисления величины полного беззнакового магнитного потока.

Первая глава представляет результаты исследований по проблеме измерения солнечных магнитных полей АО в фотосфере. Был предложен метод для устранения эффекта насыщения, возникающего в сильных магнитных полях при использовании приближении слабого поля. Для этого вместо

линейной зависимости между величиной сигнала V/I и продольной компонентой магнитного поля использовался полином третьей степени. Метод был проверен на данных телескопа SMFT и показал возможность существенно улучшить качество получаемых магнитограмм (рис. 1). Важно отметить, что применение метода не требует внесения изменений в методику наблюдений на телескопе и поэтому он может быть использован и для коррекции архивных данных. Также в главе были рассмотрены методы измерения модуля вектора магнитного поля и его продольной компоненты из анализа профилей спектральной линии. Методы опробованы на данных спектрографов Hinode/SOT/SP и БСТ-2. Стоит подчеркнуть, что для использования предложенных методов достаточно лишь измерения двух круговых поляризацій падающего излучения, что упрощает процесс регистрации и снижает объем необходимых исходных наблюдений.

Во второй главе представлен статистический анализ диссипации полного беззнакового магнитного потока для выборки из более чем 900 АО, наблюдавшихся инструментом SDO/HMI. Показана степенная зависимость между скоростью диссипации магнитного потока и максимальным магнитным потоком АО. При выражении величины DR в Мкс/ч, а Φ_{max} — в Мкс и подстановке численных значений, зависимость имеет вид:

$$DR = 1.50 \cdot 10^4 \Phi_{max}^{0.70} \quad (1)$$

Установлено, что диссипация и лидирующей, и хвостовой полярностей в биполярной АО подчиняется одной и той же зависимости. Проведено сравнение скоростей диссипации со скоростями нарастания магнитного потока в процессе всплытия, что позволило показать, что всплытие и диссипация подчиняются разным степенным законам, и, по-видимому, регулируются различными механизмами. Выделен кластер униполярных АО, демонстрирующих аномально низкую скорость диссипации магнитного потока (в десятки раз ниже), чем это ожидалось бы из степенного закона.

В третьей главе было проведен анализ возможной взаимосвязи скорости диссипации магнитного потока с некоторыми параметрами АО — электрическими токами и ультрафиолетовым излучением над пятнами АО. Обнаружено, что средняя плотность вертикальных электрических токов в АО коррелирует со скоростью диссипации. Физические причины такой корреляции остаются неясными. Наличие крупномасштабного электрического тока в области может оказывать влияние на стабилизацию магнитного потока (в некоторых областях с низкой скоростью диссипации наблюдается ненулевое значение крупномасштабного тока), однако не может быть единственным стабилизирующим фактором. АО с быстрой диссипацией при этом демонстрируют крупномасштабный ток, близкий к нулю.

Над пятнами униполярных АО была обнаружена пониженная плотность ультрафиолетового излучения по сравнению с пятнами АО остальных

морфологических классов. Это может быть вызвано более вертикальной (открытой) конфигурацией магнитных силовых линий в униполярных АО. При этом плотность излучения в униполярных АО возрастает с ростом магнитного потока АО, в то время как для биполярных и мультиполярных АО эта величина слабо варьируется с изменением магнитного потока. Для всей совокупности обнаружена слабая тенденция на увеличение плотности УФ-излучения с ростом скорости диссипации.

В четвертой главе были проанализированы несколько униполярных АО в рамках модели турбулентной эрозии. Модель подразумевает постоянную скорость схождения магнитного диффузионного фронта и, как следствие, линейную связь между периметром и скоростью изменения площади сечения магнитной трубки. Такая связь была подтверждена по результатам наблюдений для проанализированной в работе выборки.

С другой стороны, скорость уменьшения площади сечения магнитной трубки в некоторых из АО оказывается аномально низкой. Последнее может быть объяснено в рамках модели турбулентной эрозии, основным результатом которой является параболический закон уменьшения площади пятна со временем (скорость диссипации тоже уменьшается в процессе диссипации). Однако оценки, приведенные в данной работе, показывают, что АО с наименьшей скоростью диссипации должны существовать несколько лет, что противоречит наблюдениям. Таким образом, требуется обязательное наличие некоторого дополнительного механизма, сопутствующего потере магнитного потока АО.

Результаты, полученные в работе, могут быть полезны для проверки теоретических оценок процесса диссипации. Наряду с этим закономерности, выявленные для медленно диссипирующих униполярных АО, могут помочь ответить на вопросы о подфотосферной динамике магнитных трубок и о диссипации магнитного потока в фотосфере. В дальнейшем необходимо провести анализ с целью рассмотрения связи прочих факторов со скоростью диссипации магнитного потока. К примеру, следует рассмотреть влияние упомянутых в гл. 4 радиальных течений, направленных от центра солнечного пятна.

Автор диссертации считает необходимым высказать благодарность своему научному руководителю А.С. Куценко и руководителю отдела физики Солнца и Солнечной системы КрАО В.И. Абраменко за огромную помощь в написании данной диссертации и других совместных работ, а также за терпеливое руководство на тернистом пути научного познания. Хочется также поблагодарить и остальных соавторов публикаций, разработчиков и инженеров телескопов SMFT, Hinode и БСТ-2. Отдельно автор благодарит создателей и технический персонал аппарата SDO, данные которого были использованы в большей части диссертации, а также разработчиков библиотек

Numpy, Sunpy, Matplotlib и Astropy, которые значительно расширили возможности диссертанта по реализации описанных в работе алгоритмов обработки данных.

Список литературы

1. *Babcock H. W.* The Topology of the Sun's Magnetic Field and the 22-Year Cycle. // *Astrophys. J.* — 1961. — Mar. — Vol. 133. — P. 572.
2. *Charbonneau P.* Dynamo models of the solar cycle // *Living Reviews in Solar Physics.* — 2020. — Dec. — Vol. 17, no. 1. — P. 4.
3. *Gokhale M. H., Zwaan C.* The Structure of Sunspots. I: Observational Constraints: Current Sheet Models // *Sol. Phys.* — 1972. — Sept. — Vol. 26, no. 1. — P. 52—75.
4. *Krause F., Rüdiger G.* On the Turbulent Decay of Strong Magnetic Fields and the Development of Sunspot Areas // *Sol. Phys.* — 1975. — May. — Vol. 42, no. 1. — P. 107—119.
5. *Kutsenko A. S., Abramenko V. I., Pevtsov A. A.* Extended statistical analysis of emerging solar active regions // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2019. — Apr. — Vol. 484, no. 3. — P. 4393—4400.
6. *Leighton R. B.* Transport of Magnetic Fields on the Sun. // *Astrophys. J.* — 1964. — Nov. — Vol. 140. — P. 1547.
7. *Leighton R. B.* A Magneto-Kinematic Model of the Solar Cycle // *Astrophys. J.* — 1969. — Apr. — Vol. 156. — P. 1.
8. *Meyer F.* et al. The growth and decay of sunspots. // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 1974. — Oct. — Vol. 169. — P. 35—57.
9. *Norton A. A.* et al. Magnetic Flux Emergence and Decay Rates for Preceder and Follower Sunspots Observed with HMI // *Astrophys. J.* — 2017. — June. — Vol. 842, no. 1. — P. 3.
10. *Parker E. N.* The generation of magnetic fields in astrophysical bodies. X. Magnetic buoyancy and the solar dynamo. // *Astrophys. J.* — 1975. — May. — Vol. 198. — P. 205—209.
11. *Petrovay K., Moreno-Insertis F.* Turbulent Erosion of Magnetic Flux Tubes // *Astrophys. J.* — 1997. — Aug. — Vol. 485, no. 1. — P. 398—408.
12. *Ugarte-Urra I.* et al. Magnetic Flux Transport and the Long-term Evolution of Solar Active Regions // *Astrophys. J.* — 2015. — Dec. — Vol. 815, no. 2. — P. 90.