

ОТЗЫВ
официального оппонента на диссертацию Андрея Александровича Плотникова
«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»

Диссертация А.А. Плотникова представляет собой современную, актуальную исследовательскую работу, связанную с развитием методов измерения магнитного поля и изучением процессов диссипации магнитного потока в активных областях Солнца. Работа выполнена под руководством к.ф.-м.н. Александра Сергеевича Куценко в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Крымской астрофизической обсерватории (ФГБУН КрАО РАН). Измерения и исследования магнитного поля Солнца в КрАО имеют длительную славную историю, и данная работа успешно продолжает развитие этого важного направления.

Магнитное поле играет ключевую роль практически во всех проявлениях солнечной активности, наиболее яркие из которых связаны с активными областями. Разработка и усовершенствование методов определения магнитного поля в фотосфере в активных областях на основе обработки оптических наблюдений позволяет осуществлять исследования солнечной активности на существенно более высоком уровне, нежели из наблюдений солнечных пятен в интенсивности излучения. В настоящее время имеются методы определения магнитного поля в фотосфере и накоплены огромные массивы соответствующих наблюдений как наземными, так и космическими обсерваториями. Однако потребность в разработке новых методов, которые были бы точнее имеющихся, реализовывались бы с более высокой скоростью и могли бы применяться к данным разных наблюдательных инструментов, остается актуальной задачей. В последние годы в разных научных областях силу набирает применение методов машинного обучения. В данной работе такая попытка также своевременно предпринята для решения обратной задачи оптической спектрополяриметрии и показала хорошие обнадеживающие результаты в сравнении с другими методами.

Изучение процессов, связанных с диссипацией магнитного потока в активных областях, играет важную роль в физике Солнца и звезд. Во-первых, эти процессы еще не до конца изучены сами по себе, нет общепринятой количественной модели. Это является одним из препятствий на пути разработки моделей переноса потоков на Солнце – важного элемента для понимания механизмов солнечного динамо. Отчасти это связано с тем, что ранее в основном исследования опирались на наблюдения солнечных пятен в белом свете. В данной же работе сделан следующий шаг - исследования выполнены на большом наблюдательном материале непосредственно по измерениям магнитного поля на фотосфере в активных областях. Выявленные новые закономерности, связанные с диссипацией магнитного потока в активных областях, которые получены в данной работе, дают новую пищу для размышления теоретикам.

Актуальность и важность данной работы обуславливается и тем обстоятельством, что активные области являются источниками наиболее мощных событий космической погоды - солнечных вспышек, корональных выбросов массы, повышенных потоков энергичных частиц и жесткого электромагнитного излучения. Такие события оказывают влияние на межпланетное и околоземное космическое пространство, на атмосферы планет. Эти события происходят не только на фазе роста магнитного потока, но и на фазе спада, хотя, вероятно, и связаны с дополнительным всплытием новых магнитных потоков вблизи существующих в активной области. Изучение процессов диссипации магнитного потока важно для понимания эволюции активных областей, того, как магнитная энергия в

активных областях трансформируется в другие виды энергии. В свою очередь это может способствовать разработке методов прогнозирования солнечной активности и космической погоды.

Важными положительными чертами этой работы являются как глубокое понимание автором методологии определения магнитных полей на Солнце на основе наблюдений в оптическом диапазоне, так и детальный анализ большого объема наблюдательных данных по магнитному полю, полученных на основе таких наблюдений. Видно, что автор хорошо разбирается в применяемых методах и понимает ограничения имеющихся наблюдательных данных по магнитному полю, что очень важно для адекватного использования и интерпретации полученных результатов. Это является одним из веских оснований считать, что полученные результаты достоверны.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка цитируемой литературы, содержащего 139 наименования. Объем диссертации 111 страниц, включая 39 рисунков и 4 таблицы.

Во Введении дано обоснование актуальности выбранной темы диссертационной работы, сформулирована ее цель и поставлены задачи, которые необходимо было решить для достижения цели, отмечены научная новизна, научная и практическая значимость работы, сформулированы положения, выносимые на защиту, перечислены способы апробации работы, публикации по теме диссертации, обозначен личный вклад автора.

Глава 1 самая крупная, занимающая почти половину объема диссертации. В ней рассмотрены вопросы методологии определения магнитного поля на фотосфере в активных областях Солнца на основе спектрополяриметрии. Представлены основы, такие как векторы Стокса электромагнитного излучения, образование фраунгоферова спектра, эффект Зеемана, обсуждается приближение слабого магнитного поля, метод интегрирования профиля спектральной линии, способ оценки абсолютного значения вектора магнитного поля с помощью измерения компонент Стокса I и V, способы решения обратной задачи спектрополяриметрии, дано краткое описание основных инструментов для определения магнитных полей в солнечных активных областях. Далее идет описание выполненных работ по применению методов для определения магнитных полей. Решено несколько конкретных задач. Предложен метод для устранения эффекта насыщения в приближении слабого магнитного поля. Метод применен к данным наземного инструмента HSOS/SMFT посредством кросс-калибровки с данными космического инструмента SDO/HMI. Далее проверена методика оценки абсолютного значения магнитного поля ранее описанным методом интегрирования профиля спектральной линии по данным космического инструмента Hinode/SOT. Сравнение полученных значений абсолютного значения поля, полученного этим методом и с помощью известного кода инверсии MERLIN, показала хорошее согласие в диапазоне до 3 кГс. Также получены абсолютные значения поперечной компоненты магнитного поля. Далее выполнена инверсия данных наблюдений отечественным наземным инструментом БСТ-2 (в КрАО) в модели солнечной атмосферы Милна-Эддингтона для определения абсолютного значения магнитного поля и продольной лучу зрения компоненты. Выполнено сравнение с данными, полученными с помощью SDO/HMI. В целом, достигнуто неплохое соответствие. Однако замечено занижение значений на данных БСТ-2 по сравнению с данными HMI. Обсуждаются возможные причины. Наконец, представлено использование нейронной сети для решения обратной задачи спектрополяриметрии. Использовались данные наблюдений Hinode/SOT. Посредством сопоставления с результатами действия кода MERLIN показано высокое быстродействие метода при неплохом качестве воссозданных карт параметров магнитного поля в одной активной области. Представленные методы в дальнейшем могут быть использованы для определения магнитных полей в активных областях различными инструментами, включая отечественные, что важно.

Глава 2 посвящена статистическому исследованию закономерностей диссипации магнитного потока активных областей Солнца. В разделе 2.1 дан краткий обзор работ по изучению изменений площади солнечных пятен и магнитного потока со временем в активных областях. Подчеркивается необходимость дальнейшего исследования процессов диссипации магнитного потока и важность проведения систематических исследований на значительно большей выборке активных областей относительно того, как это было сделано в предшествующих работах. В разделе 2.2 приводится описание морфологической классификации активных областей. В разделе 2.3 приводятся способы измерения скорости диссипации магнитного потока и описание предложенного метода (алгоритма) автоматического выделения фазы диссипации и вычисления суммарного беззнакового магнитного потока. В разделе 2.4 разработанный алгоритм применяется к данным для установления зависимости между “линейной” скоростью диссипации суммарного беззнакового магнитного потока и его максимальным значением. На основе большой выборки (241 эфемерных и 669 активных областей) показано наличие степенной зависимости между двумя рассматриваемыми величинами. Также показано, что диссипация для лидирующей и хвостовой магнитных полярностей описывается одной числовой закономерностью в пределах ошибок. Дополнительно показано, что скорость диссипации магнитного потока в среднем меньше скорости всплытия магнитного потока в фазе роста. В разделе 2.5 демонстрируется наличие активных областей с более низкой скоростью диссипации магнитного потока и показывается, что все эти области являются униполярными. Также получен важный результат о том, что характер диссипации магнитного потока не определяется однозначно максимальным магнитным потоком активной области, должны существовать какие-то дополнительные факторы. В разделе 2.6 суммированы основные результаты. Полученные результаты можно считать вполне достоверными, учитывая большой размер выборки областей, надежность и четкость подходов к их анализу, аккуратность, с которой проделана работа.

В **главе 3** исследуются связи между “линейной” скоростью диссипации беззнакового магнитного потока (определенной в главе 2) и различными параметрами активных областей, такими как вертикальная компонента “локального” и “крупномасштабного” электрического тока, интенсивность экстремального ультрафиолетового излучения (ЭУФ). В разделе 3.1 описаны методы определения электрических токов на фотосфере в активных областях по измерениям магнитного поля. Методы использовались ранее в ряде работ коллег автора и хорошо себя зарекомендовали. Здесь же установлено, что а) скорость магнитной диссипации коррелирует с усредненной плотностью “локального” беззнакового вертикального тока, б) ненулевые “крупномасштабные” электрические токи обнаруживаются только в активных областях с низкой скоростью диссипации магнитного потока, в) такие токи не могут являться единственным фактором замедления диссипации магнитного потока. В разделе 3.2 исследуется связь магнитного потока с интенсивностью ЭУФ (в канале $304 \text{ \AA}$ по данным SDO/AIA) излучения активных областей. Показано, что плотность ЭУФ излучения в среднем меньше в униполярных активных областях относительно областей других морфологических классов. Также показано, объединенная выборка униполярных активных областей и областей других классов проявляет наличие некоторой корреляции между “линейной” скоростью диссипации магнитного потока и “плотностью” ЭУФ излучения, тогда как по отдельности для этих выборок корреляции практически нет. В разделе 3.3 даны выводы к главе 3.

В **главе 4** рассматривается диссипация магнитного потока униполярных активных областей в рамках модели турбулентной эрозии. Выбор именно таких областей обусловлен их более низкой скоростью диссипации относительно областей других морфологических классов, что вызвало интерес у автора. В разделе 4.1 кратко обсуждаются три механизма диссипации: омическая диссипация, турбулентная диффузия, турбулентная эрозия. Показаны некоторые противоречия первых двух механизмов

наблюдениям и дана мотивация важности рассмотрения третьего механизма. В разделе 4.2 приведены некоторые аспекты модели турбулентной эрозии. В разделе 4.3 показано, что площадь магнитной трубки зависит квадратично от времени, дано оценочное выражения для “времени жизни” (диссипации) магнитной трубки в рамках модели турбулентной эрозии. В разделе 4.4 сделаны оценки снизу для максимальной площади магнитной трубки и времени ее существования в рамках рассматриваемой модели посредством соотношения измеряемых параметров двух магнитных трубок. Это сделано для того, чтобы в некотором приближении исключить несколько неизвестных параметров. В разделе 4.5 приводится способ оценки скорости радиального уменьшения магнитной трубки из наблюдений ее площади и периметра в линейном приближении. В разделе 4.6 получены оценки снизу максимальной начальной площади и времени жизни трубок для шести униполярных активных областей с использованием трех опорных областей (из того же списка шести областей). Установлено, что для трех рассмотренных областей получены чрезмерно большие оценки двух этих физических параметров, не согласующиеся с наблюдениями. Сделан важный вывод о том, что модель турбулентной эрозии, без модификаций, не может объяснить наблюдаемые характеристики униполярных активных областей на стадии диссипации.

В заключении сформулированы основные результаты диссертации.

Диссертация хорошо оформлена, написана понятным языком, ошибок и опечаток содержит немного, в допустимом пределе. Диссертация четко структурирована, ее удобно читать. Все рисунки и таблицы понятны.

Все положения, выносимые на защиту, получены в ходе оригинального исследования автора. Они обоснованы, являются новыми и имеют существенную научную значимость. Ключевой вклад автора в полученные результаты не вызывает сомнения. Результаты будут использоваться в ГАИШ МГУ, ИЗМИРАН, ИКИ РАН, ГАО РАН, ИСЗФ СО РАН, САО РАН и других научных учреждениях, где ведутся работы по физике космоса и астрономии, в особенности по физике Солнца и звезд.

Результаты диссертации опубликованы в 12 печатных изданиях, 8 из которых в статьях в ведущих астрономических рецензируемых изданиях из списка ВАК, 8 – в изданиях, индексируемых Web of Science и Scopus (таких как Mon. Not. R. Astron. Soc., Sol. Phys., Res. Astron. Astrophys и др.). Результаты неоднократно докладывались на российских и международных тематических конференциях и семинарах.

По существу работы имеются следующие небольшие замечания:

1. В главе 2 определение скорости диссипации рассматривалось в линейном приближении – графики зависимости полного беззнакового магнитного потока от времени на фазе диссипации описывались линейной функцией. Однако в тексте давались ссылки на другие работы и также видно из нескольких графиков (на рис. 2.2), что для некоторых АО линейная зависимость не идеально ложится на точки данных. Любую зависимость кусочно можно приблизить линейной функцией. Но не исключено, что на всем протяжении фазы диссипации магнитного потока АО линейная зависимость не самая лучшая. Стоило бы обсудить, как это могло повлиять на результат работы о степенной зависимости между максимальным магнитным потоком АО и скоростью изменения магнитного потока.
2. При исследовании связи интенсивности ЭУФ излучения со скоростью диссипации магнитного потока использовался только один канал УЭФ излучения 304 Å. Почему аналогичное рассмотрение не выполнено для других каналов SDO/AIA (их наличие отмечено в диссертации), а также для каналов УФ излучения 1600 и 1700 Å, характеризующих более низкие слои солнечной атмосферы (хромосферу и область температурного минимума)? Это представлялось бы интересным.

3. На стр. 75. написано: “Многие наблюдательные работы подтверждают взаимосвязь между магнитным потоком АО и интенсивностью излучения спектральных линий, формируемых в верхних слоях солнечной атмосферы: Ca II K [Skumanich, Smythe, Frazier, 1975], He II [Schrijver, 1987], O V и Fe XVI [Fludra, Ireland, 2002], Fe XVIII [Warren, Winebarger, Brooks, 2012].” Не ясно, что автор называет здесь верхними слоями солнечной атмосферы. Высоты формирования перечисленных линий могут сильно отличаться. Было бы желательно указать характерные высоты формирования приведенных линий.
4. В разделе 3.2.3 показано “наличие” корреляции между логарифмами двух величин: плотности интенсивности ЭУФ излучения в канале 304 Å и “линейной” скорости диссипации беззнакового магнитного потока АО. Вывод о наличии корреляции сделан на основе оценки коэффициента корреляции 0.54. Такое невысокое значение k вызывает вопрос о действительном наличии корреляции между этими двумя величинами. Какие дополнительные аргументы автор может привести в пользу этого вывода?
5. Мне не удалось найти в диссертации определение параметра B_e модели турбулентной эрозии, впервые приведенного на стр. 89 (формула 4.2). Далее на стр. 91 написано, что B_e является модельным параметром, который нельзя получить из наблюдений в рамках поставленной задачи. Первый вопрос в связи с этим – точно ли эта величина не может быть получена (оценена) из магнитограмм, например, посредством усреднения по ближайшим внешним пикселям периметра в какой-то момент времени? Далее на стр. 91 предлагается способ обхода проблемы неизвестности параметров B_e и v_0 посредством рассмотрения пятен в двух разных АО. При этом делается допущение, что оба эти параметра константы, одинаковые для разных АО. Соответственно, второй вопрос здесь – не понятно, исходя из каких соображений сделано это предположение. Желательно было бы привести аргументы и обсудить. И вопрос три – непонятно, почему нельзя измерить (оценить) начальную площадь трубки (пятна) и радиус непосредственно из наблюдений для момента максимального магнитного потока? Уверен, что по крайней мере для части АО (униполярных) такие моменты наблюдались и были гарантированно на видимой части солнечного диска.
6. Было бы наглядно добавить цветовую палитру (colorbar) на некоторые рисунки, например, рис.1.16.
7. Стр. 49. Обработка данных нейросетью занимает менее одной минуты – желательно привести основные параметры используемой ЭВМ.
8. Почему нейронные сети были применены (раздел 1.9.4) для решения обратной задачи только данных Hinode/SOT, но не отечественного БСТ-2?
9. В формулах для определения координат центров масс 2.12 и 2.13 на стр. 61, вероятно, ошибка – не поделено на суммарный магнитный поток.
10. В правой части выражения 4.16 на стр. 94 не хватает умножения на интервал времени Δt .

Указанные замечания не являются принципиальными при оценке работы и не снижают ценности полученных научных результатов.

Считаю, что диссертация Андрея Александровича Плотникова «ДИССИПАЦИЯ МАГНИТНОГО ПОТОКА В АКТИВНЫХ ОБЛАСТЯХ НА СОЛНЦЕ», представленная на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1 – «Физика космоса, астрономия», является завершенной научной работой и содержит

новые важные, полезные результаты. Диссертация полностью соответствует критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного постановлением правительства РФ №842 от 24.09.2013 г., а также специальности 1.3.1 — Физика космоса, астрономия и отрасли физико-математических науки, а ее автор несомненно заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук.

Кандидат физико-математических наук (специальность 01.03.03 – физика Солнца),
старший научный сотрудник,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических
исследований Российской академии науки (ФГБУН ИКИ РАН)

Иван Викторович Зимовец

08 октября 2025 г.

Профсоюзная ул. 84/32, Москва, Россия, 117997
ivanzim@cosmos.ru
8-916-517-50-20



Подпись к.ф.-м.н., с.н.с. И.В. Зимовца заверяю
Ученый секретарь ИКИ РАН
к.ф.-м.н., Андрей Михайлович Садовский