

Отзыв на диссертацию

Куценко Александра Сергеевича

ЛОКАЛЬНЫЕ МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ НА СОЛНЦЕ,

представленную на соискание ученой степени

доктора физико-математических наук

по специальности 1.3.1. «Физика космоса, астрономия»

В диссертационной работе проведен анализ появления и эволюции локальных магнитных полей различных пространственных масштабов в атмосфере Солнца. Основной целью было выявление закономерностей их развития, которые могут указать на механизмы их возникновения и особенности существования в конвективной зоне звезды. Конечно, это огромная задача, которую мы все вместе сможем решить только общими усилиями. Но диссертант внес в наше понимание основных процессов, связанных с магнитным полем на Солнце, свой очень важный вклад. По существу, работа состоит из нескольких крупных блоков, тесно связанных между собой, но в то же время имеющих самостоятельное научное значение. **Нет сомнения в актуальности данной работы, поскольку исследования космоса и применение их результатов в народном хозяйстве и обороне страны опираются в значительной мере на понимание природы солнечной активности, и эта связь все нарастает.**

Для достижения поставленных целей диссертанту пришлось проявить как экспериментальное мастерство, так и высокий исследовательский потенциал.

Необходимо было решить следующие задачи:

1. Разработать методы для вычисления скорости нарастания магнитного потока, тилта и геометрических размеров эфемерных и активных областей на этапе всплытия, провести анализ этих величин для большой выборки объектов.

2. Исследовать артефакты в измерениях солнечных магнитных полей, проводимых основными инструментами, используемыми в работе.

3. Разработать и создать инструмент для спектрополяриметрии активных областей на Солнце, провести модернизацию Башенного солнечного телескопа имени ак. А.Б. Северного (БСТ-1, КраО РАН). Разработать процедуры для проведения наблюдений, учета инструментальной поляризации и обработки получаемых данных.

4. Создать алгоритмы для вычисления скорости вращения эфемерных и активных областей как единых магнитных структур. Для большой выборки объектов провести расчеты скоростей вращения и выполнить их интерпретацию.

5. Адаптировать методы для расчетов плотности электрических токов в активных областях под наблюдения современных инструментов. Разработать процедуры для расчетов токовой спиральности и скрученности магнитных полей. Провести анализ пространственных и временных вариаций токовой спиральности в активных областях.

6. Разработать методы для измерения дисбаланса магнитного потока всего диска Солнца, сопоставить их с прямыми наблюдениями. Выявить вклад различных участков солнечной поверхности в дисбаланс.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Для выборки из 423 объектов показано, что зависимость скорости нарастания магнитного потока всплывающих активных областей от их максимального полного

беззнакового магнитного потока наилучшим образом аппроксимируется степенным законом.

2. Скорость вращения эфемерных и активных областей имеет тенденцию к уменьшению при увеличении максимального полного магнитного потока магнитной структуры. При этом скорость вращения индивидуальна для каждой эфемерной или активной области. На этапе всплытия угловая скорость вращения активных областей равновероятно может как увеличиваться или уменьшаться, так и быть неизменной. После окончания всплытия магнитной структуры угловая скорость ее вращения остается постоянной.

3. Система электрических токов активной области возмущается новым магнитным потоком, который всплывает в непосредственной близости от уже существующей магнитной структуры еще до появления этого магнитного потока на поверхности. Высокая степень скрученности магнитных жгутов является благоприятным фактором для высокой скорости нарастания магнитного потока во время всплытия активных областей.

4. Дисбаланс магнитного потока по всему диску Солнца определяется ансамблем относительно небольших магнитных элементов, суммарная площадь которых не превышает 10% от площади видимого диска.

5. Разработан и создан новый инструмент для спектрополяриметрии активных областей и участков спокойной атмосферы Солнца с высоким спектральным разрешением.

Первая глава посвящена описанию подходов, применяемых для измерения магнитных полей на Солнце, а также основных инструментов, используемых для этого. Особое внимание уделено новому солнечному спектрополяриметру, установленному на Башенном солнечном телескопе имени академика А.Б. Северного (БСТ-1, КрАО РАН) и созданному в рамках данной диссертационной работы.

Вторая глава посвящена выявлению основных закономерностей всплытия активных областей, которые являются результатом существования в атмосфере Солнца магнитных полей с плотностью магнитного потока порядка сотен или тысяч Mкс см^{-2} . Под всплытием подразумевается процесс появления магнитной структуры на уровне фотосферы Солнца. В общей сложности было выделено более 600 активных областей, всплывших на видимой стороне солнечного диска за временной интервал с мая 2010 по декабрь 2017 г. Для 423 из них явно выделены моменты начала и окончания всплытия магнитного потока, наблюдавшиеся в пределах 60° от центрального меридиана. Показано, что статистически скорость нарастания магнитного потока и максимальный магнитный поток активных областей наилучшим образом описываются степенным законом.

В третьей главе исследуются особенности вращения активных и эфемерных областей по видимому диску. Показано, что систематически более быстрое вращение групп пятен по сравнению с фоновой невозмущенной плазмой, помимо физических причин, может быть связано с особенностями измерения их положений и типичной эволюцией групп пятен. Было выполнено также исследование скоростей вращения активных эфемерных областей. Важным соображением является то, что измерялась скорость вращения эфемерной или активной области как единой магнитной структуры, которая может состоять из множества отдельных элементов, а не каждого элемента в отдельности. Важность этого соображения состоит в том, что сегодня есть значительные аргументы в пользу того, что объекты солнечной активности не являются слитными образованиями, а представляют собой скопление более мелких элементов. В среднем эфемерные области вращаются быстрее активных областей. При этом скорость вращения остается неизменной после окончания всплытия магнитного потока.

В четвертой главе проводится анализ электрических токов и токовой спиральности в активных областях. При анализе знака спиральности во всплывающих активных областях было установлено, что к моменту окончания нарастания магнитного потока не наблюдается какой-либо сегрегации знака по полушариям. Результаты анализа показали,

что к моменту окончания всплытия направление закрутки магнитных силовых линий соответствует ожидаемому согласно правилу полушарий только в 36 активных областях (50%), т.е. ровно в половине выборки. Из исследования можно сделать вывод, что ожидаемый знак усредненной спиральности возникает в активной области не на этапе всплытия, а во время последующей эволюции. Последнее очень важно, поскольку правило сегрегации используется в некоторых моделях динамо.

В работе также был проведен анализ связи нормированной скорости нарастания магнитного потока во всплывающих активных областях с величиной скрученности в них. Согласно многим моделям, эти параметры должны быть связаны. Результаты показали, что нет однозначной связи между величинами, наблюдается лишь слабая тенденция увеличения скорости нарастания потока с ростом скрученности. Для крупных активных областей скорость нарастания потока в среднем возрастает при увеличении скрученности магнитного жгута, формирующего активную область.

В данной работе был впервые проведен анализ структурных функций токовой спиральности. Анализ показал, что характерный линейный размер структур токовой спиральности редко превышает 10 Мм. Можно предположить, что увеличение перемежаемости перед всплытием отражает резкие изменения в системе электрических токов активной области, в том числе их фрагментацию и перестройку. Возмущение может создаваться (наведенными) электрическими токами всплывающего магнитного потока, появление которых на поверхности опережает магнитное поле. Если гипотеза верна, то можно сделать два вывода. Во-первых, электрические токи активных областей распространяются дальше в пространстве, чем магнитное поле, в том числе проникая на некоторую глубину в конвективную зону. Во-вторых, резкое изменение структуры токовой спиральности может быть диагностическим средством, свидетельствующим о скором всплытии нового магнитного поля в уже сформированной активной области. Такие события часто приводят к возникновению вспышек.

В пятой главе показано, что наблюдаемый дисбаланс магнитного потока по всему видимому диску Солнца определяется ансамблем локальных магнитных полей на поверхности, суммарная площадь которых не превышает 10% площади диска. Исследования показали, что его знак коррелирует с полярностью межпланетного магнитного поля, измеряемого на орбите Земли.

Отдельно следует сказать о Заключении, которое не только суммирует прямые результаты, но и дает качественную картину подповерхностной эволюции магнитных полей. Сразу скажу, что оно мне очень понравилось и заслуживает отдельной публикации.

На некоторой глубине в конвективной зоне магнитный жгут, формирующий впоследствии активную область в атмосфере, представляет собой относительно когерентную структуру. Это очень важное соображение. По-видимому здесь вполне работает динамо среднего поля, и именно оно определяет собой солнечный 11-летний цикл. Хотя всплытие происходит путем дробления жгута на тонкие магнитные волокна, сечения которых сопоставимы с размером грануляции, и их последующего перехода через слой резкого падения плотности плазмы у поверхности, в наблюдаемой атмосфере монолитность магнитных элементов восстанавливается. На этапах выхода магнитного потока на поверхность может наблюдаться как всплытие одиночного магнитного диполя, так и последовательное, разнесенное во времени и пространстве появление нескольких магнитных петель. Тем не менее, в последнем случае крупные магнитные элементы наиболее часто объединяются в единые ведущую и хвостовую полярности.

Спиральность магнитных жгутов формируется внутри конвективной зоны, о чем свидетельствует всплытие активных областей с уже текущими в них электрическими токами. Высокая степень скрученности является одним из факторов, благоприятствующих быстрому нарастанию магнитного потока при появлении магнитных структур на поверхности. В то же время, направление закрутки магнитного поля вокруг оси жгута

(или знак спиральности) является случайным. Доминирование определенного знака (отрицательного для северного полушария и положительного для южного) возникает только в результате последующей эволюции активной области уже в атмосфере Солнца.

Сделанные автором усовершенствования и расчеты, несомненно, являются новыми.

1. Впервые для большой выборки объектов проведен статистический анализ скорости нарастания магнитного потока в эфемерных и активных областях на этапе всплытия. Исследование стало возможным благодаря запуску космических обсерваторий, проводящих непрерывные наблюдения магнитных полей на Солнце с высоким пространственным и временным разрешением.

2. Впервые для большой выборки эфемерных и активных областей проведен анализ скоростей их вращения как единых магнитных структур. Установлено, что скорость вращения остается неизменной после окончания всплытия магнитного потока.

3. Показано, что при использовании изображений в континууме при проведении измерений вариации скорости вращения активных областей по диску Солнца могут быть следствием особенностей изменения морфологии магнитных диполей.

4. Впервые проведен анализ токовой спиральности в активных областях методами спектров перемежаемости. Обнаружено, что сформировавшаяся система электрических токов активной области может возмущаться подповерхностными магнитными потоками, которые позже всплывают в пределах активной области.

У меня фактически нет сколько-нибудь серьезных замечаний к работе. Наоборот, я извлек очень много полезного для себя. Поэтому мои соображения носят скорее характер размышлений, которые возникают при чтении любой неординарной работы.

Главы 4 и 5 заставляют задуматься над глубоким, в какой-то мере философским вопросом о соотношении характерных масштабов магнитного поля на Солнце. На протяжении многих лет крупномасштабное и маломасштабное магнитное поля рассматривались и изучались независимо. И к этому было много оснований. Крупномасштабное магнитное поле генерируется динамо среднего поля в конвективной зоне. Оно прекрасно описывает 11-летний цикл, зависимость активности от широты, глобальную структуру гелисферы, существование корональных дыр, общую согласованность поведения северного и южного полушарий. В малом масштабе мы видим уже более быстрые процессы, вспышки, тонкую структуру в пятнах и, вообще, на всей поверхности. В работах диссертанта видно, что это разделение не совсем корректно. Тонкую структуру и связанную с ней спиральность мы видим уже в конвективной зоне, хотя после всплытия она сильно деформируется. Дисбаланс, который наблюдается на очень больших расстояниях в межпланетном поле, связан с малым масштабом, что кажется просто удивительным, поскольку силовые линии элементов малого масштаба должны замыкаться на малых высотах. Мне кажется, что настало время отойти от этого противопоставления. Диссертант удачно использует термины когерентность и фрагментирование. То есть внутри «крупномасштабного» поля существуют фрагментированные элементы, а интегральные свойства определяются когерентностью этих элементов и усиливаются при их слиянии.

В первой части первой главы дан довольно обширный обзор методов измерения магнитного поля и, в особенности, параметров Стокса. По-существу магнитометр – это высокого уровня измеритель поляризации. Магнитное поле непосредственно не измеряется. Прибор должен обеспечивать адекватное измерение основных параметров поляризации, и затем из этих параметров извлекается информация о магнитном поле. Решение этой второй части невозможно без знания теории образования линии. И если для измерения полной напряженности магнитного поля можно обойтись без теории, то компоненту поля невозможно определить без применения соответствующей теории. Для

обработки наблюдений в фотосфере используется приближение Милна-Эддингтона и предполагается, что линия образуется в результате процессов истинного поглощения. Этот метод пригоден для обработки материалов магнитографа. Основой являются расчеты, выполненные еще в середине 50-х годов прошлого века Васабуро Унно или, в несколько более общей форме, Д.Рачковским. Это приближение используется во всем мире. Во второй части диссертант описывает спектрополяриметр, созданный непосредственно в рамках этой диссертационной работы. Прибор обеспечивает наблюдения в нескольких спектральных линиях, что позволяет ставить задачу о высотном разрезе. Однако здесь возникают другие трудности, о которых диссертант не говорит. Дело в том, что в хромосфере при расчетах спектральных линий необходимо учитывать также и рассеяние, что необыкновенно затрудняет задачу интерпретации. Правда, точность определения трансверсальной компоненты поля, особенно в хромосферных линиях, настолько низка, что поправки, которые могли бы возникнуть при учете рассеяния в линии, скорее всего ниже инструментальных ошибок.

Отдельный вопрос касается уровня образования спектральных линий. Точного знания о высотных градиентах и уровнях образования у нас нет. На рисунках 1.7 и 1.8 диссертант приводит графики уровней образования линий, но неясно, как они получены, и не указана точность расчета высоты.

Не полностью описан процесс калибровки приборной поляризации. В работе предполагается, что приборное поляризационное устройство устанавливается непосредственно перед входной щелью спектрографа. Но при этом не учитывается возможная приборная поляризация на зеркалах телескопа, которая к тому же может меняться в процессе наблюдения и зависит от положения зеркал.

Не обсуждается также вопрос о вкладе рассеянного света при наблюдениях в пятнах и вариация калибровочных параметров при вариации профиля спектральной линии при переходе от невозмущенной фотосферы в область факела и далее, в пятно.

Как я уже говорил, обзорные части диссертации по-существу носят характер монографии, которую я всячески рекомендую автору написать. В связи с этим, некоторым недостатком можно считать недостаточно полное цитирование российских ранних работ. Так, почти полностью игнорируются большие циклы работ Гетлинга о формах эволюции уже всплывшего магнитного поля, Бадалян о типах вращения и связи с 22-летним циклом. Не описаны старые, но важные работы по первым типам магнитографов, которые были созданы у нас в стране в 60-е годы прошлого века. Можно было упомянуть работы по новому магнитографу в ИЗМИРАН, который, правда, сейчас в реконструкции. Для оценки работ по переносу излучения в магнитоактивной среде следовало, наряду с работами Унно и Рачковского, упомянуть и работы В.Е. Степанова, В.Н. Обридо и монографию Стенфло.

С каждым годом становится все более ясно, насколько космическая погода связана с проблемами развития экономики и обороны страны. Во всем мире это осознается как одна из самых актуальных проблем. Вместе с тем, в нашей стране, ввиду практически полного исчезновения системы службы Солнца, прогностические центры вынуждены строить свою деятельность на зарубежных данных, которые в любой момент могут перестать быть доступными. Поэтому обеспечение работы хотя бы на одной обсерватории страны, без сомнения, является чрезвычайно актуальным.

Разработанные диссертантом методики успешно применяются на обсерватории, что подтверждает их надежность и обоснованность. Результаты прошли неоднократную апробацию в ведущих научных журналах, на семинарах и российских и международных конференциях. Все научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, полностью обоснованы,

Полученные результаты вполне достоверны, поскольку получены на основе большого количества наблюдений на различных наземных и внеатмосферных телескопах.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 268 страниц, включая 74 рисунка и 4 таблицы. Список литературы содержит 374 наименования.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 23 работах. 20 работ опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК, 20 - в периодических научных изданиях, индексируемых Web of Science и Scopus

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Диссертация полностью соответствует критериям, установленным п.9 Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного постановлением правительства РФ №842 от 24.09.2013 г., по специальности 1.3.1. «Физика космоса, астрономия», а ее автор Куценко Александр Сергеевич заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук.

Главный научный сотрудник ИЗМИРАН
Доктор физико-математических наук
Профессор
В.Н. Обридко

Обридко Владимир Нухимович,
Доктор физико-математических наук
Профессор
Тел. 8-916 326 0107, obridko@mail.ru

Главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук (ИЗМИРАН)
108840 г. Москва, г. Троицк, Калужское шоссе 4, ИЗМИРАН.

