

На правах рукописи

Sign

Куценко Александр Сергеевич

Локальные магнитные поля на Солнце

Специальность 1.3.1 —
«Физика космоса, астрономия»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени доктора
физико-математических наук

Научный — 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Крымская астрофизическая обсерватория РАН» (КрАО РАН).

Научный консультант: доктор физико-математических наук
Абраменко Валентина Изосимовна

Официальные оппоненты: **Фамилия Имя Отчество,**
доктор физико-математических наук, профессор,
Не очень длинное название для места работы,
старший научный сотрудник

Фамилия Имя Отчество,
кандидат физико-математических наук,
Основное место работы с длинным длинным
длинным длинным названием,
старший научный сотрудник

Фамилия Имя Отчество,
кандидат физико-математических наук,
Основное место работы с длинным длинным
длинным длинным названием,
старший научный сотрудник

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования с длинным длинным длинным длинным названием

Защита состоится **DD mmmmmmmmm** **YYYY** г. в **XX** часов на заседании диссертационного совета Д 24.1.021.01 при Главной (Пулковской) астрономической обсерватории Российской академии наук по адресу: 196140, Санкт-Петербург, Пулковское шоссе, д. 65/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке **Название библиотеки.**

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 196140, Санкт-Петербург, Пулковское шоссе, д. 65/1, ученому секретарю диссертационного совета Д 24.1.021.01.

Автореферат разослан **DD mmmmmmmmm** 2025 года.

Телефон для справок: **+7 (0000) 00-00-00.**

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 24.1.021.01,
канд. физ.-мат. наук

Sign

Осипова А.А.

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Наиболее ярким проявлением солнечного магнетизма являются активные области – места выхода сильных локальных магнитных полей из конвективной зоны в атмосферу Солнца [van Driel-Gesztelyi, Green, 2015]. Активные области выделяются заметной эмиссией в широком диапазоне длин волн от радио- до рентгеновского излучения на фоне невозмущенной атмосферы. В белом свете активные области обнаруживаются как группы пятен. Магнитные поля активных областей обычно наблюдаются в виде скрученных магнитных жгутов. На ранних этапах своего появления на поверхности арки магнитных петель поднимаются через фотосферу в хромосферу и корону, постепенно достигая своего максимального развития. Дальнейшая эволюция этих магнитных структур является причиной наиболее значимых геоэффективных событий, определяющих космическую погоду в окрестности Земли. Наиболее сильные солнечные вспышки, в том числе сопровождающиеся солнечными протонными событиями, а также значительная часть корональных выбросов массы происходят в активных областях. Последующий распад магнитных структур вследствие диффузионных процессов приводит к появлению в фотосфере мелкомасштабных магнитных элементов, которые переносятся к полюсам меридиональной циркуляцией и распределяются на большие площади диффузией и дифференциальным вращением. На границах областей с преобладанием магнитных элементов одного знака формируются волокна, эрупция которых является вторым основным источником корональных выбросов массы.

Основная прикладная задача физики Солнца – прогнозирование солнечной активности как на масштабах часов или дней, так и на более длительном временном интервале порядка лет или десятилетий. Надежный прогноз подразумевает доскональное понимание физических причин геоэффективных явлений, т.е. механизмов генерации магнитного поля на Солнце, формирования магнитных жгутов и их появления в виде локальных магнитных концентраций магнитного потока в атмосфере, возникновения неустойчивых состояний магнитных структур с последующими эруптивными событиями. Сложность комплексного анализа всей этой цепочки связана как с недоступностью прямых наблюдений процессов, происходящих в конвективной зоне Солнца, так и с колоссальной разницей масштабов явлений, что делает невозможным на текущем этапе одновременное моделирование всей картины солнечного магнетизма. Следовательно, долгосрочные прогнозы обычно ограничиваются оценкой общей солнечной активности, например, в терминах числа солнечных пятен.

Обычно предполагается, что глобальное магнитное поле, ответственное за возникновение активных областей, генерируется на некоторых глубинах в конвективной зоне Солнца в результате работы механизма глобаль-

ного динамо. Модели глобального динамо начали активно развиваться в середине прошлого века в попытке объяснить наблюдаемые проявления солнечного магнетизма. Поскольку прямые наблюдения генерации магнитного поля в конвективной зоне невозможны, правомочность модели может быть подтверждена сопоставлением наблюдаемых проявлений магнитных полей на поверхности Солнца с результатами численных расчетов. Наиболее изученным и явным проявлением магнетизма к середине прошлого века являлись солнечные пятна, поэтому выявленные для них закономерности стали своеобразными реперами для моделей динамо. Так, модель должна описывать не только сам процесс генерации или поддержания магнитных полей и, соответственно, групп пятен, но и объяснять их 11-летнюю цикличность и широтный дрейф их преимущественного появления на поверхности с фазой цикла [бабочки Маундера, Carrington, 1858; Maunder, 1922]. Последнее явление связывают с динамо-волной, которая распространяется в конвективной зоне от средних широт к экватору в течение солнечного цикла. Кроме того, группы пятен показывают ряд других устойчивых тенденций, таких как преимущественная ориентация осей магнитных диполей, также зависящая от широты [закон Джоя, Hale et al., 1919], и определенный знак магнитного поля в ведущих и хвостовых частях активных областей [закон Хейла, Hale, Nicholson, 1925].

Глобальное магнитное поле Солнца обычно разделяют на полоидальную P и тороидальную T составляющие. Полоидальное магнитное поле наиболее явно обнаруживается в минимумах активности на полюсах: структура глобального магнитного поля в этих фазах цикла напоминает магнитный диполь, что видно по изображениям солнечной короны и по прямым измерениям поверхностных магнитных полей. Тороидальное магнитное поле, наоборот, наиболее заметно проявляется в фазах максимума и, как считается, порождает активные области. Модели глобального динамо описывают возможные механизмы последовательного циклического преобразования полоидального глобального магнитного поля Солнца в тороидальное $P \rightarrow T$ и затем снова в полоидальное $T \rightarrow P$, но уже обратного знака. В разных моделях предложены различные конкретные механизмы для каждого из переходов. $P \rightarrow T$ преобразование во многих моделях происходит за счет дифференциального вращения Солнца (Ω -эффект). Для объяснения обратного $T \rightarrow P$ перехода привлекаются α -эффект [Parker, 1955a], сохранение магнитного момента отдельных активных областей при поверхностном переносе потока меридиональной циркуляцией [surface flux transport, например Wang, Nash, Sheeley, 1989] и другие механизмы. Необходимо подчеркнуть, что видимые на поверхности Солнца *локальные* концентрации магнитного потока непосредственно участвуют в циклической работе *глобального* динамо. Например, магнитное поле полярных шапок меняет знак вблизи максимума цикла за счет постоянного дрейфа небольших магнитных элементов к полюсам, а средний тилт групп пятен в дан-

ном цикле находится в антикорреляции с амплитудой следующего цикла [Dasi-Espuig et al., 2010].

Одной из широко упоминаемых моделей является феноменологическая модель глобального динамо Бэбкока [Babcock, 1961], которая качественно объясняет солнечный цикл и наблюдаемые на поверхности статистические свойства групп пятен, однако не предоставляет строгого математического аппарата для расчетов. Численное моделирование динамо-процесса стало возможным на основе модели динамо среднего поля [Krause, Raedler, 1980] с различными вариациями, что позволяет описать большой круг явлений глобального магнетизма, включая, например, флуктуации амплитуды цикла. С ростом вычислительных мощностей появилась возможность проводить численное магнитогидродинамическое (МГД) моделирование генерации магнитных полей в конвективной зоне звезд [например, Fan, Fang, 2014]). Такие расчеты показывают солнцеподобную цикличность магнитных полей и формирование структур, схожих с магнитными жгутами [Chen, Rempel, Fan, 2017], однако результаты моделирования все еще недостаточно соответствуют наблюдениям. Широкое распространение получили модели, включающие комбинацию различных механизмов для преобразования между полоидальной и тороидальной компонентами глобального магнитного поля [см., например, Hazra et al., 2023]. Детальное рассмотрение моделей выходит за рамки данной работы и читатель может обратиться к множеству обзоров, описывающих значительный прогресс в развитии теории динамо в последнее время, например, [Charbonneau, Sokoloff, 2023]. С другой стороны, в нашем понимании внутренних процессов генерации магнитного поля на Солнце все еще остается много открытых вопросов [см., например, п. 1.3 в Charbonneau, 2020], а также не достигнут консенсус о некоем едином механизме динамо.

Значительное развитие инструментальных возможностей в последние десятилетия и скрупулезный долговременный анализ солнечного магнетизма на различных пространственных масштабах поставили еще более сложные задачи перед теорией глобального динамо. Множество наблюдательных данных свидетельствует о том, что на Солнце могут одновременно развиваться две динамо-волны, смещенных по фазе на 11 лет при длительности цикла строго 22 года [Martin, 2024], что является развитием концепции протяженного солнечного цикла [extended solar cycle, Wilson et al., 1988; Obridko, Shibalova, Sokoloff, 2023]. Каждая из динамо-волн исходно проявляется на высоких широтах в виде небольших магнитных диполей. В продолжение цикла средняя величина магнитного потока в диполях растет, а зоны их появления смещаются ближе к экватору. Группы пятен являются лишь видимым в белом свете превышением магнитными диполями некоторых характерных значений магнитного потока. Явным подтверждением такой гипотезы может быть одновременное появление групп пятен на высоких и низких широтах в интервалы минимума активности, при этом

группы пятен показывают противоположные знаки магнитного поля в ведущих (хвостовых) частях в одном полушарии. В свете этих исследований можно говорить о происходящей сейчас смене парадигмы солнечного цикла, что, несомненно, бросает новые вызовы моделям динамо.

Подобная смена парадигмы происходит и в вопросах формирования и подъема к поверхности магнитных жгутов, которые порождают активные области. Важно отметить, что солнечное динамо в целом подразумевает генерацию или поддержание глобального магнитного поля за счет упорядоченных движений плазмы в конвективной зоне. Конкретным механизмам возникновения локальных магнитных полей, т.е. концентрации глобального тороидального магнитного поля в отдельные жгуты, уделяется заметно меньше внимания. В предыдущие годы наиболее укоренившаяся точка зрения была связана с накоплением магнитного потока и формированием магнитных жгутов вблизи основания конвективной зоны [Parker, 1975; van Ballegoijen, 1982; Moreno-Insertis, Schuessler, Ferriz-Mas, 1992; Rempel, 2003]. Согласно нашим представлениям, на границе зоны лучистого переноса и вращающейся дифференциально конвективной зоны – в области тахоклина – происходит уменьшение скорости вращения плазмы с увеличением расстояния от центра Солнца. Такие условия могут быть наиболее благоприятными для накопления магнитного потока и последующего возникновения магнитных жгутов на данной глубине. В ранних работах, направленных на объяснение наблюдаемых свойств групп пятен, подразумевалось наличие уже сформированных магнитных жгутов у основания конвективной зоны. Жгуты, предположительно, поднимаются к поверхности в результате магнитной плавучести [Parker, 1955b] или ряда других неустойчивостей. Широкое распространение получило приближение тонких магнитных трубок [thin flux tube approximation, Spruit, 1981], в рамках которого полагается, что поперечный размер жгута значительно меньше его длины и давление внутри и снаружи жгута сбалансировано. Модель достаточно успешно применялась для объяснения ряда свойств активных областей, включая закон Джоя, широтное распределение групп пятен и часто наблюдаемую более когерентную структуру ведущих полярностей магнитных диполей [Choudhuri, Gilman, 1987; Caligari, Moreno-Insertis, Schussler, 1995]. Например, влиянием эффекта Кориолиса может определяться геометрия поднимающейся сквозь конвективную зону магнитной петли, что обеспечивает тилт активной области при ее появлении на поверхности [например, D'Silva, Choudhuri, 1993].

В последнее время парадигма формирования магнитных жгутов у основания конвективной зоны сталкивается со все большими вызовами. Она много критикуется, поскольку подразумевает значительные величины напряженности магнитного поля в жгутах для противодействия конвекции в достаточно плотной плазме или требует подключения дополнительных механизмов для поддержания существования жгутов как когерентных струк-

тур. Сейчас появляется все больше свидетельств того, что формирование магнитных жгутов может происходить в пределах всей толщины конвективной зоны [например, Nelson et al., 2011; Augustson et al., 2015] или даже в ее приповерхностных слоях в области лептоклина [глубина $\approx 0.98R_{Sun}$, Vasil et al., 2024], где также наблюдается уменьшение скорости вращения плазмы с уменьшением глубины [Howe et al., 2000]. Недавние МГД расчеты, учитывающие наиболее полно как турбулентную природу плазмы в конвективной зоне, так и возможное присутствие фоновых магнитных полей, показывают, что даже равномерно распределенные на небольшой глубине, относительно слабые магнитные поля с напряженностью порядка 1 кГс, не сконцентрированные в магнитные жгуты, могут порождать в результате подъема на поверхность структуры, схожие с активными областями [Stein, Nordlund, 2012]. Также предложены механизмы формирования магнитных жгутов в приповерхностных слоях. Например, в работах [Brandenburg, Kleeorin, Rogachevskii, 2013; Käpylä et al., 2016] показано, что в условиях сильно стратифицированной турбулентности около поверхности Солнца может возникать особая неустойчивость отрицательного эффективного магнитного давления (negative effective magnetic pressure instability, NEMPI), которая приводит к концентрации фонового магнитного поля в когерентную структуру, напоминающую магнитную трубку. Результаты численных расчетов последних лет показывают, что роль магнитной плавучести и эффекта Кориолиса в формировании и подъеме магнитных жгутов на поверхность может быть переоценена, тогда как заметно большее влияние оказывают конвективные турбулентные потоки и фоновое магнитное поле [Weber et al., 2023]. Серьезным препятствием является резкое изменение плотности плазмы при переходе от основания конвективной зоны к поверхности, что значительно затрудняет моделирование генерации и подъема магнитного жгута через всю конвективную зону в атмосферу Солнца. В целом, развитие новых моделей в попытке решить явные недостатки предыдущих изысканий приводит к возникновению все большего количества гипотез о генерации и формировании локальных концентраций магнитного потока.

Одним из направлений, которое может помочь установить подповерхностную структуру магнитных жгутов и причины их возникновения, является локальная гелиосейсмология [Gizon, Birch, 2005]. Подход основан на анализе волновых процессов на поверхности Солнца, который позволяет при использовании ряда предположений получить информацию о внутренних процессах. Прежде всего, методы гелиосейсмологии дают возможность оценить скорости движения плазмы в конвективной зоне и тем самым выявить локальные неоднородности на различных глубинах. К сожалению, даже для одних и тех же случаев различные подходы локальной гелиосейсмологии приводят к различным выводам относительно подповерхностных течений под активными областями [Gizon et al., 2009; 2010]. Кроме того,

до конца неясна картина взаимодействия МГД волн с магнитным полем [Cally, Moradi, 2013], что значительно затрудняет интерпретацию результатов исследований [Tripathy, 2023]. В данной работе развивается другое направление для анализа подповерхностной структуры солнечного магнетизма, а именно ведется поиск таких свойств локальных магнитных полей, которые могут служить опорой для однозначного понимания их генерации и возникновения на поверхности Солнца.

Не менее актуальным остается прикладной вопрос прогноза экстремальных событий на Солнце (вспышки и корональные выбросы массы), который также затрагивается в этой работе. Согласно общепринятой точке зрения, причиной таких нестационарных процессов является пересоединение магнитных жгутов в атмосфере. Несмотря на серьезные успехи в развитии различных методов, в том числе включающих использование машинного обучения, точность прогноза едва превышает показатели, достигнутые десятки лет назад. Одной из возможных причин этого является то, что многие подходы основаны на анализе наиболее доступных для наблюдений магнитных полей на уровне фотосферы, тогда как пересоединение, по всей видимости, происходит в короне или в хромосфере. Это одна из мотиваций развивать новые инструменты для измерения магнитных полей в «объеме» активной области, что достигается при одновременном наблюдении ряда спектральных линий, формирующихся на различных высотах. В данном исследовании также уделено внимание созданию нового солнечного спектрополяриметра в Крымской астрофизической обсерватории, который позволяет проводить измерения магнитных полей активных областей в хромосфере и фотосфере.

Цель данной работы – выявить закономерности появления и развития локальных концентраций магнитного потока (активных и эфемерных областей), которые указывают на механизмы их формирования в конвективной зоне Солнца.

Для достижения поставленной цели 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 по диску Солнца эфемерных и активных областей как единых магнитных структур. Для большой выборки объектов провести расчеты скоростей вращения, 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.

Научная новизна:

1. Впервые для большой выборки объектов проведен статистический анализ скорости нарастания магнитного потока в эфемерных и активных областях на этапе вспытия. 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 по диску Солнца как единых магнитных структур. Установлено, что скорость вращения остается неизменной после окончания вспытия 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.

Научная и практическая значимость

Теоретическая значимость определяется основной целью работы – результаты могут быть использованы для развития моделей генерации и формирования локальных магнитных полей в конвективной зоне Солнца и их последующего подъема к поверхности. Апробация подобных моделей может выполняться путем сопоставления расчетных свойств магнитных структур с реально наблюдаемыми характеристиками, полученными в том числе в данной работе.

Разработанный и созданный в рамках данной работы инструмент для спектрополяриметрии Солнца в Крымской астрофизической обсерватории РАН может быть использован для проведения фундаментальных и прикладных исследований плазмы и магнитных полей в фотосфере и нижней хромосфере.

Результаты исследования могут быть использованы в практических целях для прогнозирования геомагнитных возмущений, вызванных активностью Солнца. Обнаруженные связи между скоростью нарастания магнитного потока в активных областях и их всплывающей продуктивностью применимы в алгоритмах прогноза солнечных вспышек. Найденный эффект влияния нового всплывающего магнитного потока на систему электрических токов в активной области может быть использован для заблаговременной регистрации такого события. С другой стороны, новый магнитный поток, всплывающий внутри активных областей, часто приводит к дестабилизации равновесных состояний и возникновению вспышек и корональных выбросов массы. Результаты анализа взаимосвязи между локальными магнитными полями и общим магнитным полем Солнца, совмещенные с моделями поверхностного переноса магнитного потока, могут быть использованы для заблаговременного прогноза знака межпланетного магнитного поля.

Методология и методы исследования.

Основная методология работы – анализ и интерпретация распределения и динамики наблюдаемых на Солнце магнитных полей и их производных. Для анализа данных наблюдений применялись различные апробированные методы для расчета магнитного потока магнитных структур и его вариаций, электрических токов и токовой спиральности, пространственных спектров перемежаемости и мощности, других величин.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Зависимость скорости нарастания магнитного потока всплывающих активных областей R от их максимального полного беззнакового магнитного потока Φ_{max} наилучшим образом аппроксимируются степенным законом $R \propto \Phi_{max}^{0.48 \pm 0.02}$, что установлено для выборки из 423 объектов.
2. Скорость вращения эфемерных и активных областей по диску Солнца 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 всплывания угловая скорость вращения активных областей равновероятно может показывать как увеличение или уменьшение, так и быть неизменной. После окончания всплывания магнитной структуры угловая скорость ее вращения по диску Солнца 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 превосходит 10% от площади видимого диска.
5. Разработан и создан новый инструмент для спектрополяриметрии активных областей и участков спокойной атмосферы Солнца с высоким спектральным разрешением.

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием общедоступных наблюдений магнитных полей Солнца современными космическими и наземными инструментами, а также применением апробированных, хорошо развитых методов. Результаты находятся в хорошем согласии с выводами, полученными другими авторами.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на 25 международных и всероссийских конференциях:

- Всероссийская астрономическая конференция (ВАК-2024) «Современная астрономия: от ранней вселенной до экзопланет и черных дыр» 25–31 августа 2024, САО РАН, Нижний Архыз
- Всероссийская конференция «Магнетизм и активность Солнца» [2022, 2023, 2024] КрАО РАН, Научный, Крым
- Ежегодная конференция «Физика плазмы в солнечной системе» [2018, 2019, 2020, 2021, 2022, 2023] ИКИ РАН, Москва
- Всероссийская ежегодная конференция по физике Солнца «Солнечная и солнечно-земная физика» [2016, 2017, 2018, 2019, 2022, 2023] ГАО РАН, Санкт-Петербург
- Всероссийская конференция «Современные инструменты и методы в астрономии» 4–9 сентября 2023, САО РАН, Нижний Архыз
- Международная Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике «Физические процессы в космосе и околоземной среде» [2019, 2022] ИСЗФ СО РАН, Иркутск
- Всероссийская астрономическая конференция (ВАК-2021) «Астрономия в эпоху многоканальных исследований» 23–28 августа 2021, ГАИШ МГУ, Москва
- Всероссийская конференция «Магнетизм, циклы активности и вспышки на Солнце и звездах» 3–7 июня 2018, КрАО РАН, Научный, Крым

- Всероссийская астрономическая конференция (ВАК-2017) «Астрономия: познание без границ» 17–22 сентября 2017, Ялта, Крым
- 17-ая международная солнечная конференция «Физика солнечной плазмы и активность Солнца» 4–10 сентября 2016, КрАО РАН, Научный, Крым
- IAU Symposium 365 «Dynamics of Solar and Stellar Convection Zones and Atmospheres» 21–25 August 2023, Yerevan, Armenia
- 5th Asia Pacific Solar Physics Meeting, 3–7 February 2020, Pune, India
- 16th European Solar Physics Meeting, 6–10 September 2021, online
- IAU Symposium 340 «Long-term datasets for the understanding of solar and stellar magnetic cycles» 19–23 February 2018, Jaipur India

Исследования, описанные в диссертационной работе, были частично поддержаны грантами Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 16-02-00221 «Динамика нестационарных процессов на Солнце», руководитель Гопасюк О.С., 16-42-910493 «Солнечный магнетизм на разных пространственных и временных масштабах», руководитель Абраменко В.И., 17-02-00049 «Наблюдательные аспекты генерации и диссипации магнитных полей на Солнце», руководитель Абраменко В.И., 17-52-53203 «Мультифрактальность спиральных характеристик магнитных полей Солнца на фазе спада 22-24-го циклов активности: новые наблюдательные аспекты и посылки для теории динамо», руководитель Кузаян К.М., 19-52-53045 «Глобальные структуры магнитной спиральности и циклическая активность Солнца за десятилетия», руководитель Кузаян К.М.), Российского научного фонда (проекты 18-12-00131 «Магнитное поле Солнца как источник его активности на различных пространственно-временных масштабах», руководитель Абраменко В.И., 19-72-00027 «Раннее прогнозирование вспышечной продуктивности активных областей на Солнце», руководитель Куценко А.С.), программой Президента Китайской академии наук PIFI (проект 2024VMB0007).

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 23 печатных изданиях, 20 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, 20 в периодических научных изданиях, индексируемых Web of Science и Scopus..

1. *Abramenko V. I., Tikhonova O. I., Kutsenko A. S.* Diagnostics of Turbulent Dynamo from the Flux Emergence Rate in Solar Active Regions // *Geomagnetism and Aeronomy.* — 2017. — Dec. — Vol. 57, no. 7. — P. 792–797.
2. *Abramenko V. I., Zhukova A. V., Kutsenko A. S.* Contributions from Different Type Active Regions Into the Total Solar Unsigned Magnetic Flux // *Geomagnetism and Aeronomy.* — 2018. — Dec. — Vol. 58, no. 8. — P. 1159–1169.

3. *Abramenko V. I., Kutsenko A. S., Tikhonova O. I., Yurchyshyn V. B.* Analysis of the Flux Growth Rate in Emerging Active Regions on the Sun // *Solar Physics*. — 2017. — Apr. — Vol. 292, no. 4. — P. 48.
4. *Fursyak Y. A., Kutsenko A. S., Abramenko V. I.* Distributed Electric Currents in Solar Active Regions // *Solar Physics*. — 2020. — Feb. — Vol. 295, no. 2. — P. 19.
5. *Kutsenko A. S., Abramenko V. I.* Using SDO/HMI Magnetograms as a Source of the Solar Mean Magnetic Field Data // *Solar Physics*. — 2016. — Aug. — Vol. 291, no. 6. — P. 1613–1623.
6. *Kutsenko A. S., Abramenko V. I., Yurchyshyn V. B.* Contribution to the Solar Mean Magnetic Field from Different Solar Regions // *Solar Physics*. — 2017. — Sept. — Vol. 292, no. 9. — P. 121.
7. *Kutsenko A. S., Abramenko V. I., Kuzanyan K. M., Xu Haiqing, Zhang Hongqi* Intermittency spectra of current helicity in solar active regions // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2018. — Nov. — Vol. 480, no. 3. — P. 3780–3787.
8. *Kutsenko A. S., Abramenko V. I.* Flux emergence rate of active regions as a probe for turbulent dynamo action // *Long-term Datasets for the Understanding of Solar and Stellar Magnetic Cycles*. Vol. 340 / ed. by D. Banerjee et al. — 02/2018. — P. 299–300. — (IAU Symposium).
9. *Kutsenko A., Terebizh V., Dolgoplov A., Abramenko V., Plotnikov A., Semyonov D., Skiruta V., Lopukhin V.* The Spectro-Polarimeter of the Andrei B. Severny Solar Tower Telescope at the Crimean Astrophysical Observatory: Optical Design and Implementation // *Solar Physics*. — 2024. — Sept. — Vol. 299, no. 9. — P. 132.
10. *Kutsenko A. S.* The rotation rate of solar active and ephemeral regions - I. Dependence on morphology and peak magnetic flux // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2021. — Jan. — Vol. 500, no. 4. — P. 5159–5166.
11. *Kutsenko A. S., Abramenko V. I.* Probing the rotation rate of solar active regions: the comparison of methods // *Open Astronomy*. — 2022. — Jan. — Vol. 30, no. 1. — P. 219–224.
12. *Kutsenko A. S., Abramenko V. I., Kutsenko O. K.* On the possibility of probing the flare productivity of an active region in the early stage of emergence // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2021. — Mar. — Vol. 501, no. 4. — P. 6076–6082.
13. *Kutsenko A. S., Abramenko V. I., Litvishko D. V.* The rotation rate of solar active and ephemeral regions - II. Temporal variations of the rotation rates // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2023. — Mar. — Vol. 519, no. 4. — P. 5315–5323.
14. *Kutsenko A. S., Abramenko V. I., Pevtsov A. A.* Extended statistical analysis of emerging solar active regions // *Monthly Notices of the*

- Royal Astronomical Society. — 2019. — Apr. — Vol. 484, no. 3. — P. 4393–4400.
15. *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.
 16. *Kutsenko A. S., Yang Shangbin, Abramenko V. I., Semyonov D. G.* Experiments on high-spatial-resolution observations of the Sun at the A.B. Severny Solar Tower Telescope of the Crimean Astrophysical Observatory // *Acta Astrophysica Taurica*. — 2022. — Dec. — Vol. 3, no. 3. — P. 8.
 17. *Kutsenko O. K., Abramenko V. I., Kutsenko A. S.* The Magnetic Power Spectra of Decaying Active Regions: New Evidence for the Large-Scale Magnetic Flux Bundle Submergence? // *Solar Physics*. — 2024. — July. — Vol. 299, no. 7. — P. 102.
 18. *Kutsenko O. K., Kutsenko A. S., Abramenko V. I.* Magnetic Power Spectra of Emerging Active Regions // *Solar Physics*. — 2019. — Aug. — Vol. 294, no. 8. — P. 102.
 19. *Litvishko D. V., Kutsenko A. S., Abramenko V. I.* Analysis of Differential Rotation of Anti-Hale Active Regions // *Geomagnetism and Aeronomy*. — 2024. — Jan. — Vol. 63, no. 8. — P. 1111–1115.
 20. *Plotnikov A., Abramenko V., Kutsenko A.* Estimation of the Lifetime of Slow-Decaying Unipolar Active Regions in the Framework of the Turbulent Erosion Model // *Solar Physics*. — 2024. — Mar. — Vol. 299, no. 3. — P. 34.
 21. *Plotnikov A., Kutsenko A., Yang Shangbin, Xu Haiqing, Bai Xianrong, Zhang Hongqi, Kuzanyan K.* Improvements of the Longitudinal Magnetic Field Measurement from the Solar Magnetic Field Telescope at the Huairou Solar Observing Station // *Solar Physics*. — 2021. — Nov. — Vol. 296, no. 11. — P. 165.
 22. *Plotnikov A. A., Abramenko V. I., Kutsenko A. S.* Correction to: 'Statistical analysis of the total magnetic flux decay rate in solar active regions' // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2023a. — June. — Vol. 521, no. 4. — P. 6293–6294.
 23. *Plotnikov A. A., Abramenko V. I., Kutsenko A. S.* Statistical analysis of the total magnetic flux decay rate in solar active regions // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2023b. — May. — Vol. 521, no. 2. — P. 2187–2195.

Личный вклад. В работах, в которых соискатель является первым автором, им была выполнена основная часть исследований, включая постановку задачи, проведение расчетов, интерпретация результатов и подготовку публикации. Большая часть статей подготовлена в соавторстве с научным консультантом Абраменко В.И., которая предоставляла свои ал-

горитмы для расчетов, принимала участие в обсуждении результатов, подготовке текстов статей. Работы, в которых соискатель не является первым автором, также связаны с тематикой диссертации и их результаты приведены для создания более целостной картины эволюции локальных магнитных полей на Солнце. В этих работах соискатель принимал активное участие в определении методов и данных для исследований, в обсуждении результатов и частично в проведении расчетов, в написании текста статей.

Спектрополяриметр БСТ-1 КрАО РАН был разработан и создан под руководством соискателя. Им была сформулирована научная задача для инструмента и основные технические требования, выбраны целевые спектральные линии, разработаны программное обеспечение для проведения наблюдений, математические методы для обработки спектров и извлечения информации о поляризации излучения, процедуры и алгоритмы для юстировки и калибровки инструмента. Оптическая схема спектрополяриметра БСТ-1 КрАО РАН была рассчитана Теребижем В.Ю., конструкторские изыскания выполнены Долгополовым А.В.

Магнито-морфологическая классификация предложена Абраменко В.И. и в дальнейшем разрабатывалась ею совместно с Жуковой А.В., Сулеймановой Р.А. и соискателем. Методологические работы по измерениям магнитных полей и исследования диссипации магнитного потока выполнены совместно с Плотниковым А.А. Работы по анализу электрических токов проводились совместно с Фурсяком Ю.А. Исследования спектров мощности магнитного поля проводились совместно с Куценко О.К. Работы, связанные с вращением активных областей, частично выполнялись совместно с Литвишко Д.В.

Содержание работы

Во введении обосновывается актуальность исследования, проводимого в рамках диссертационной работы, формулируется цель и ставятся основные решаемые задачи, излагается научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

Первая глава посвящена описанию подходов, применяемых для измерения магнитных полей на Солнце, а также основным инструментам, используемым 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.

Измерение магнитных полей в фотосфере и хромосфере основано на регистрации эффекта Зеемана в магниточувствительных спектральных линиях с учетом поляризации. Получаемый вектор Стокса солнечного излучения используется как входные данные в обратных задачах для определения магнитного поля и термодинамических параметров атмосферы Солн-

ца. Решение обратной задачи в общем случае требует решения уравнения переноса излучения, что в настоящее время возможно лишь численно. Тем не менее, в рамках ряда приближений возможно получить аналитическое решение, обычно для спектральных линий, формирующихся в фотосфере. Эти подходы хорошо развиты и широко применяются для анализа данных множества инструментов, в том числе в автоматическом режиме.

Основным инструментом, данные которого использовались в работе, был *Helioseismic and Magnetic Imager* [HMI, Schou et al., 2012; Scherrer et al., 2012] космической обсерватории *Solar Dynamics Observatory* [SDO, Pesnell, Thompson, Chamberlin, 2012]. Он представляет собой узкополосный фильтрограф, оснащенный анализатором поляризации. Инструмент предназначен для измерения полного вектора магнитного поля и продольных доплеровских скоростей плазмы по наблюдениям фотосферной линии Fe I 6173 Å. В качестве детекторов используются ПЗС матрицы формата 4096 × 4096 пикселей, пространственный сэмплинг составляет 0.503'' на пиксель. Пространственное разрешение инструмента определяется дифракционным пределом и приблизительно равно 1''. Данные наблюдений используются для получения нескольких типов магнитограмм, а также карт доплеровских скоростей и изображений Солнца в континууме. Расположение обсерватории на геостационарной орбите дает возможность вести непрерывные наблюдения Солнца, не зависящие от погодных условий и естественной смены темного и светлого времени суток, что характерно для наземных инструментов. Данные SDO/HMI доступны с временным разрешением 45 с и 720 с. Наблюдения ведутся с мая 2010 года по настоящее время, что позволило использовать их для выявления статистических закономерностей появления и развития активных областей на Солнце для значительных выборок объектов. Помимо SDO/HMI, в работе также используются наблюдения ряда других обсерваторий, таких как *Solar and Heliospheric Observatory* [SOHO, Domingo, Fleck, Poland, 1995], *Hinode* [Kosugi et al., 2007] и *Huairou Solar Observing Station* (HSOS).

В первой главе приводится описание нового инструмента, созданного в КРАО РАН, предназначенного для прецизионной спектрополяриметрии Солнца вблизи фотосферных спектральных линий Fe I 5247.1 Å и 5250.2 Å, а также линии Mg I b_2 5172 Å, ядро которой формируется в нижней хромосфере на высотах от 500 до 800 км. Прибор представляет собой классический щелевой эшелле-спектрограф высокого разрешения с минимально необходимым количеством оптических элементов и с возможностью проводить измерения поляризации. Добавление в конструкцию расщепителя поляризации перед детектором позволило одновременно регистрировать спектры в двух взаимно ортогональных поляризационных состояниях. В рабочий прибора попадают одновременно десятки магниточувствительных спектральных линий в трех спектральных порядках, ширина каждого из которых равна 15 Å. Типичное время одиночной экспозиции на-

ходится в пределах 5–15 мс, при этом соотношение сигнал/шум превышает 200. Спектральное разрешение составляет $\mathfrak{R} \approx 70000$. Были разработаны алгоритмы для обработки данных спектрополяриметра, включающие учет темнового тока и рассеянного света, коррекцию неоднородности ширины входной щели и различной чувствительности пикселей детектора, нормировку на единичный континуум, устранение кривизны спектральных порядков и спектральных линий, коррекцию неоднородной дисперсии и учет инструментальной поляризации.

На рисунке 1 показано сравнение изображений в континууме и карт продольного магнитного поля активной области NOAA 13712, полученных спектрополяриметром БСТ-1 и инструментом SDO/HMI. Из рисунка видно хорошее согласие между величинами. Продольное магнитное поле определялось методом центра тяжести в спектральной линии Fe I 5250.2 Å.

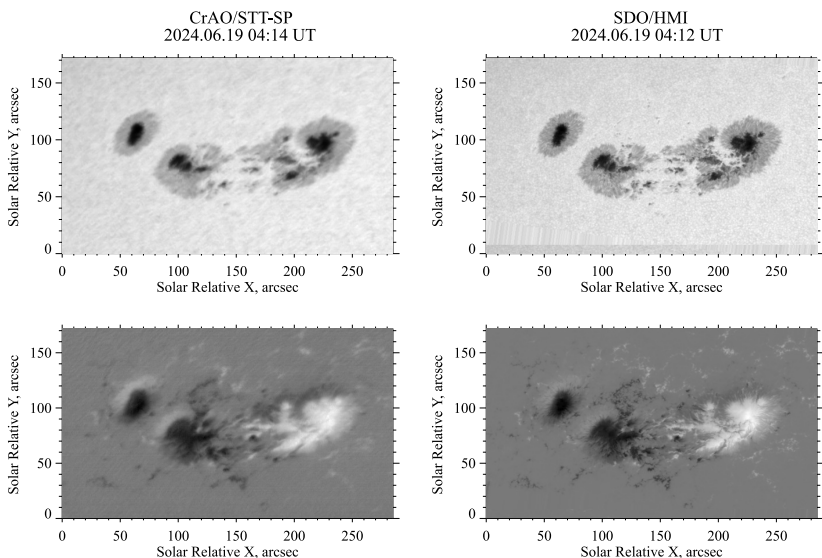


Рисунок 1 — Изображения в континууме (сверху) и карты продольного магнитного поля (снизу) активной области NOAA 13712, полученные 19 июня 2024 около 04:30 UT спектрополяриметром БСТ-1 (левые панели) и инструментом SDO/HMI (правые панели). Карты приведены к одному пространственному масштабу. Изображения, полученные инструментом SDO/HMI, повернуты для соответствия картам БСТ-1.

Вторая глава посвящена выявлению основных закономерностей вспытия активных областей. Под «всплытием» подразумевается процесс появления магнитной структуры на уровне фотосферы Солнца, для которого в англоязычной литературе используется термин «emergence».

Активные области являются результатом появления в атмосфере Солнца магнитных полей с плотностью магнитного потока порядка сотен или тысяч Мкс см^{-2} . Обычно предполагается, что эти поля поднимаются из-под фотосферы в виде локальных магнитных жгутов. Последние, скорее всего, формируются в конвективной зоне в результате накопления и/или усиления магнитного потока глобального тороидального магнитного поля, на что указывает преимущественная ориентация осей магнитных диполей в направлении, параллельном солнечному экватору.

Одной из основных характеристик всплывающих активных областей является скорость нарастания магнитного потока (англ. magnetic flux emergence rate или magnetic flux growth rate). Эта величина может определяться рядом факторов, которые оказали влияние на формирование магнитного жгута и его подъем через конвективную зону. В работе проводится подробный анализ этой величины для большой статистической выборки активных областей, а также исследуются факторы, которые могут на нее влиять. Использовались карты продольного магнитного поля полного диска, полученные инструментом SDO/HMI. Каждая активная область отслеживалась во время ее прохождения по диску Солнца. Выбирались только «изолированные» активные области, т.е. всплывающие на участках невозмущенной атмосферы без значительного присутствия посторонних магнитных структур. Для каждого объекта создавалась последовательность магнитограмм с временным разрешением 12 минут, охватывающая саму активную область и участок спокойного Солнца, на котором она всплывает. Для компенсации солнечного вращения методом кросс-корреляции определялось положение активной области на последующих во времени магнитограммах полного диска и выделялся соответствующий участок.

Для каждого объекта рассчитывался ряд параметров, таких как максимальный полный беззнаковый магнитный поток Φ_{max} , время его нарастания до максимального значения, расстояние между центрами противоположных магнитных полярностей, тилт активной области и другие величины. В общей сложности было выделено более 600 активных областей, всплывающих на видимой стороне солнечного диска за временной интервал с мая 2010 по декабрь 2017 г. Из них для 423 явно выделены моменты начала и окончания всплытия магнитного потока, наблюдавшиеся в пределах 60° от центрального меридиана. Полный максимальный магнитный поток активных областей выборке варьировался в пределах от $0.36 \cdot 10^{21}$ Мкс до $25.3 \cdot 10^{21}$ Мкс. Средняя скорость нарастания магнитного потока R_{av} рассчитывалась путем аппроксимации кривой изменения полного магнитного потока кусочно-линейной функцией, что понятно из рисунка 2. Проведенное исследование показало, что скорость нарастания магнитного потока варьируется для различных активных областей близких максимальных магнитных потоков. Визуальный анализ процесса развития активной области может дать одно из объяснений, заключающееся в том, что качественно

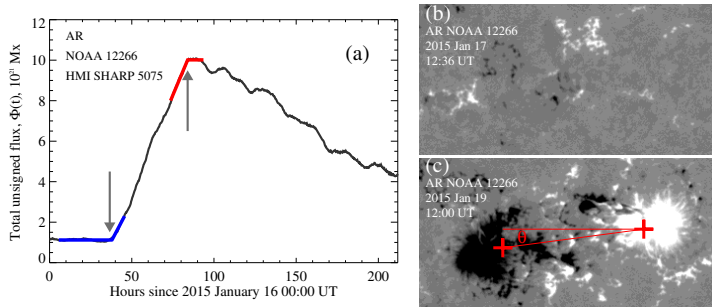


Рисунок 2 — Изменение полного беззнакового магнитного потока $\Phi(t)$ (слева) и SDO/HMI карты продольного магнитного поля активной области NOAA 12266, наблюдавшейся в январе 2015 г. На панели (а) синей и красной кривой показаны кусочно-линейные аппроксимации функции $\Phi(t)$, использованные для определения времени начала (t_{emerg}) и окончания (t_{max}) вспытия. Магнитограммы на правых панелях показаны в моменты, обозначенные серыми стрелами на панели (а). На панели (с) красными крестами обозначены положения вычисленных центроидов противоположных полярностей, красные прямые объясняют метод измерения тилта активной области.

картина появления потока на поверхности может характеризоваться двумя сценариями. В первом на начальных этапах на магнитограммах всплывают только небольшие магнитные структуры противоположных полярностей. Со временем они сливаются в более крупные, расстояние между которыми постепенно увеличивается. Характерной особенностью такой картины является появление только двух крупных когерентных магнитных образований противоположной полярности – ведущей и хвостовой частей активной области. Новый всплывающий магнитный поток появляется на поверхности строго между ними в виде небольших удлинённых магнитных элементов различной полярности (англ. *serpentine lines*), которые постепенно мигрируют в разные стороны, объединяясь с уже сформированной ведущей или хвостовой полярностью. Эта картина вполне соответствует появлению на уровне фотосферы единого магнитного жгута, испытывающего фрагментацию на границе конвективная зона-фотосфера и восстанавливающего свою когерентность со временем. Для второго сценария морфология магнитной структуры на первых этапах появления активной области заметно отличается качественно. Вместо формирования только двух крупных противоположных полярностей образуется несколько пар соизмеримых магнитных когерентных диполей, разнесённых как в пространстве, так и во времени. Эти относительно крупные элементы также постепенно мигрируют в противоположные стороны и, сливаясь, создают ведущую и хвостовую полярности активной области.

Статистически скорость нарастания магнитного потока и максимальный магнитный поток активных областей наилучшим образом описываются степенным законом $R \propto \Phi_{max}^\kappa$. Показатель степени существенно различается по данным различных работ, хотя этот параметр определяется физическими механизмами, задействованными во время всплывтия магнитных диполей, и может указать на какой-либо приоритетный процесс. На рисунке 3 показана зависимость средней скорости нарастания магнитного потока от максимального магнитного потока активной области. Видно, что в двойном логарифмическом масштабе наблюдается линейная связь между величинами. Черная прямая на рисунке показывает линейную аппроксимацию распределения, которая описывается уравнением $R_{av} = 0.43\Phi_{max}^{0.48 \pm 0.02}$, где R_{av} измеряется в 10^{20} Мкс ч⁻¹, а Φ_{max} в 10^{21} Мкс.

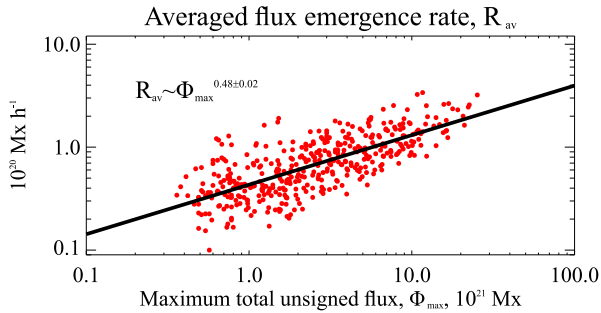


Рисунок 3 — Зависимость средней скорости нарастания магнитного потока R_{av} от максимального магнитного потока для выборки из 423 активных областей. Черная прямая показывает наилучшую линейную аппроксимацию распределения.

В третьей главе исследуются особенности вращения активных и эфемерных областей по видимому диску. Многочисленные наблюдения показывают, что скорость перемещения различных структур по поверхности Солнца отличается от скорости движения плазмы на этой же широте. Эти структуры, такие как активные области, корональные точки, группы пятен, корональные дыры, волокна и др., обычно связаны с выходом магнитного поля из конвективной зоны в атмосферу, поэтому отличия в скорости вращения могут быть обусловлены продолжением их магнитных каркасов во внутренних слоях Солнца.

Дифференциальное вращение обычно описывается с помощью формулы Фая (англ. Faye)

$$\omega = A + B \sin^2 \phi + C \sin^4 \phi, \quad (1)$$

где ϕ — гелиографическая широта, A — экваториальная скорость вращения, B и C — константы, ответственные за дифференциальность вращения. Чис-

ленные значения определяются путем аппроксимации получаемого распределения угловых скоростей для различных широт.

В работе для анализа скорости вращения активных и эфемерных областей использовался метод трассеров. Он основан на прямом измерении угловой скорости вращения выбранных структур в атмосфере Солнца. Для ее определения необходимо разделить величину смещения структуры по долготе на временной интервал, в течение которого происходило смещение. В качестве трассеров выбирают любые структуры, которые возможно выделить в атмосфере Солнца. Естественно, что наиболее часто используются группы пятен или отдельные пятна, общая длительность наблюдений которых составляет несколько столетий. Столь обширный ряд данных позволил выявить вариации скорости дифференциального вращения Солнца с фазой цикла активности, обнаружить зависимость между морфологией, площадью, возрастом самих групп пятен и скоростью их перемещения по поверхности. В частности, во многих работах было показано, что группы пятен вращаются быстрее окружающей плазмы, при этом большие группы показывают тенденцию перемещаться медленнее малых групп. В ряде исследований обнаружено систематическое изменение скорости вращения групп пятен с возрастом (ускорение либо замедление). Также в качестве трассеров используют магнитные элементы различных размеров, корональные дыры, супергранулы, корональные яркие точки, волокна и другие виды солнечных образований.

В данной работе 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. Действительно, хвостовое пятно в группе пятен обычно показывает более быструю фрагментацию и диссипацию по сравнению с ведущим. Как было указано Кристофом Петроваем в работе [Petrovay, 1993], такая картина приводит к постепенному смещению центра тяжести группы в сторону ведущей части. Если центр тяжести используется для определения положения всей группы, то будет происходить искусственное смещение ее координат в западном направлении помимо реального вращения.

Были проведены численные оценки степени влияния эффекта более быстрой диссипации хвостовой части группы пятен на величину измеряемой скорости вращения. Для анализа использовались магнитограммы продольного поля и изображения в континууме, полученные инструментом SDO/HMI. Результаты показали, что определенная по изображениям в белом свете скорость вращения выше для любых широт. Более того, разница между экваториальными скоростями, измеренными по магнитограммам и по изображениям в континууме, сопоставима с вариацией скоростей между экватором и наиболее высокими широтами, на которых вообще наблюдаются активные области. Можно заключить, что для более корректного

измерения скорости вращения необходимо использовать карты магнитных полей в качестве исходных данных.

В данной работе было выполнено исследование скоростей вращения активных эфемерных областей, для чего использовались магнитограммы полного диска продольного поля, полученные инструментом SDO/HMI. Одним из существенных отличий от предыдущих работ [например, Lamb, 2017] 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. Под эфемерными областями понимались магнитные диполи, всплытие которых явно прослеживается визуально на участках невозмущенной фотосферы и которые не имели присвоенных NOAA или HARP номеров. Такой выбор объектов для исследования потребовал их ручного выделения на магнитограммах полного диска прямоугольным контуром. Отслеживание эфемерной или активной области осуществлялся методом кросс-корреляции на предыдущих и последующих во времени картах продольного магнитного поля. Отслеживание прекращалось, если центр выделенной области удалялся более чем на 60° от центрального меридиана. Все трассеры были изолированными в том смысле, что за все время наблюдения границу рамки не пересекал сколь-либо значимый магнитный поток извне. Таким образом были выделены 864 активных области, наблюдавшиеся с 05 мая 2010 г. по 31 декабря 2016 г. Количество активных областей на Солнце значительно меньше количества эфемерных областей, однако было выбрано только 322 последних. Они выбирались преимущественно около центра диска на участках, свободных от остатков магнитного потока диссипировавших активных областей.

Гелиографическая долгота трассера $\theta(t)$ определялась как *среднее арифметическое* долгот центроидов противоположных магнитных полярностей. Это также существенно отличается от предыдущих исследований, в которых обычно определялся взвешенный по площади пятен или по магнитному потоку всей активной области центр. На рисунке 4 графически продемонстрирован использованный метод. Красной и синей кривыми показаны вариации гелиографической долготы центроидов противоположных магнитных полярностей в активной области NOAA 11066. Зеленая кривая на рисунке показывает среднее арифметическое этих долгот, а черная – средневзвешенную по модулю плотности магнитного потока долготу всей активной области без разделения на полярности.

Для измерения синодической скорости вращения ω_{syn} кривая $\theta(t)$ аппроксимировалась линейной функцией, наклон аппроксимации принимался за ω_{syn} . Для уменьшения влияние собственных взаимных движений магнитных элементов внутри активной области на этапе всплытия, для аппроксимации использовался только участок $\theta(t)$, соответствующий интервалу наибольшего развития объекта, обычно от достижения максимально-

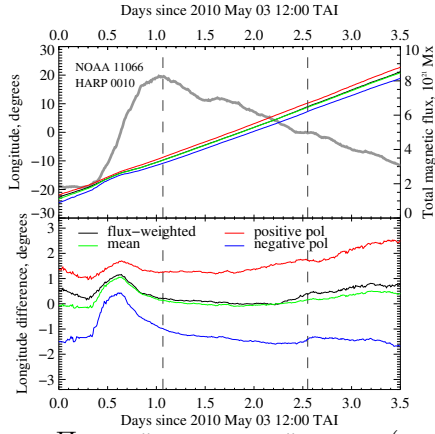


Рисунок 4 — Сверху — Полный магнитный поток (толстая серая кривая) активной области NOAA 11066. Цветные линии показывают долготу средневзвешенного по модулю плотности магнитного потока положительной (красная кривая) и отрицательной (синяя кривая) полярности активной области. Средняя долгота активной области и средневзвешенная по плотности магнитного потока без учета знака поля показаны зеленой и черной кривой, соответственно. Снизу — Разница между измеренными долготами активной области и опорной точкой, вращающейся с постоянной скоростью. Вертикальные штриховые линии на обеих панелях показывают временной интервал, для которого проводилась аппроксимация средней долготы линейной функцией для измерения скорости вращения.

го магнитного до его уменьшения приблизительно вдвое от максимального. Сидерическая скорость трассера ω_{sid} рассчитывалась из синодической с помощью поправки, учитывающей взаимное вращение Земли и Солнца.

На рисунке 5 показаны измеренные сидерические скорости вращения активных и эфемерных областей. Ошибки показывают неопределенность σ_ω линейной аппроксимации $\theta(t)$ на уровне $1 \cdot \sigma$. Видно, что, как и ожидается, эфемерные области показывают больший разброс скоростей по сравнению с активными областями. По-видимому, это связано с большим влиянием турбулентных движений плазмы на поверхности на небольшие магнитные структуры эфемерных областей. Распределения были аппроксимированы выражением 1 методом Левенберга-Марквардта, вес точек в процедурах рассчитывался как $1/\sigma_\omega$. Численно аппроксимации описываются выражениями

$$\omega_{sid} = 14.369 - 2.54 \sin^2 \phi - 1.77 \sin^4 \phi \quad (2)$$

для активных областей и

$$\omega_{sid} = 14.47 - 1.62 \sin^2 \phi - 3.32 \sin^4 \phi \quad (3)$$

для эфемерных областей, где константы A , B и C измеряются в $^{\circ}\text{сут}^{-1}$. Погрешности в определении констант приведены на рисунке 5. Несмотря на значительный разброс скоростей, явно видно, что в среднем эфемерные области вращаются быстрее активных областей.

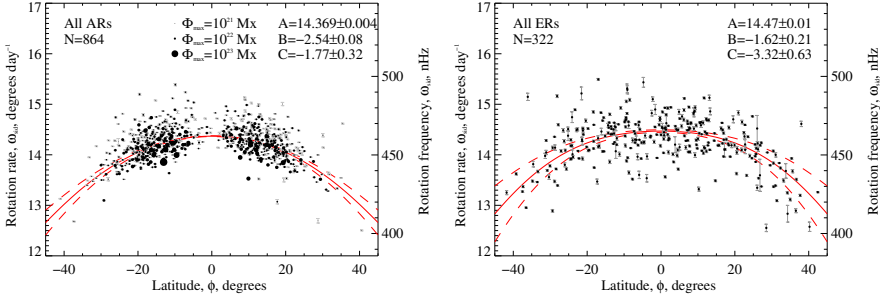


Рисунок 5 — Зависимость сидерической скорости вращения активных (левая панель) и эфемерных (справа) областей от гелиографической широты. Размер кружка на левой панели пропорционален максимальному магнитному потоку активной области. Ошибки показывают неопределенность линейной аппроксимации долготы $\theta(t)$ на уровне $1 \cdot \sigma$. Красная сплошная кривая показывает наилучшую аппроксимацию распределения выражением 1, штриховые красные кривые – доверительный интервал на уровне 2σ . Значения констант A , B , C и их ошибки определения представлены на панелях.

Площадь кружков на левой панели рисунка 5 пропорциональна максимальному магнитному потоку активных областей. Визуальный и более подробный численный анализ показывает, что активные области с меньшим максимальным магнитным потоком показывают тенденцию более быстрого вращения. В таблице 1 приведены значения коэффициентов дифференциального вращения из выражения 1, полученные в данной работе для средней скорости активных и эфемерных областей и в предыдущих исследованиях других авторов различными методами. Из сопоставления видно, что наблюдается хорошее согласие между скоростями вращения проанализированных здесь активных областей и рекуррентных пятен, изученных Ньютоном и Нанном [Newton, Nunn, 1951]. В то же время, несмотря на то, что скорость вращения активных областей ниже, чем найденная для групп пятен во множестве предыдущих работ, она все еще превышает скорость плазмы, измеренную спектроскопическим методом. Можно заключить, что магнитные биполи перемещаются на поверхности Солнца все-таки быстрее, чем окружающая их плазма, что все еще не нашло своего общепринятого объяснения.

Таблица 1 — Сравнение коэффициентов из уравнения Фая 1, полученных в данной работе и в предыдущих исследованиях различными методами.

Метод	$A, ^\circ \text{сут}^{-1}$	$B, ^\circ \text{сут}^{-1}$	$C, ^\circ \text{сут}^{-1}$	Источник
Активные области	14.369	−2.54	−1.77	Эта работа
Эфемерные области	14.47	−1.62	−3.32	Эта работа
Рекуррентные пятна	14.38	−2.96	−	[Newton, Nunn, 1951]
Спектроскопия	13.76	−1.74	−2.19	[Howard, Harvey, 1970]
Спектроскопия	14.05	−1.49	−2.61	[Snodgrass, 1984]
Спектроскопия	14.04	−2.03	−2.07	[Ulrich et al., 1988]

Также был проведен поиск возможных вариаций скоростей вращения активных областей как на этапе всплытия, так и на фазах диссипации. Для всплывающих активных областей вычислялась «мгновенная» скорость, а не усредненная за время максимального развития области. Из общей выборки было выделено 65 трассеров, которые удовлетворяли следующим критериям: 1) активная область должна всплывать на видимой стороне диска на участках спокойного Солнца без значительного предсуществующего магнитного потока; 2) должен наблюдаться преимущественно одиночный эпизод всплытия. Результаты измерения для трех активных областей показаны на рисунке 6. Верхние панели демонстрируют изменение полного магнитного потока, средние – расстояние между центроидами противоположных магнитных полярностей. Вариации угловой скорости вращения с временным шагом 12 часов показаны на нижних панелях рисунка 6.

Было обнаружено, что активные области из выборки можно разделить на три подмножества, опираясь на одну из трех возможных качественных картин изменения угловой скорости вращения на этапе всплытия. В первом подмножестве скорость увеличивается, что наблюдалось для 15 из 65 случаев. Соответствующий профиль с ускорением показан на левой нижней панели рисунка 6. Для 25 активных областей из 65, наоборот, наблюдалось замедление, что продемонстрировано на нижней центральной панели рисунка 6. Еще для 25 случаев угловая скорость вращения не показывала какого-либо тренда, изменяясь со временем около некоторого среднего значения. Пример такой активной области NOAA 11855 приведен на нижней правой панели рисунка 6. Следовательно, нельзя говорить о некоем систематическом изменении скорости вращения активных областей на стадиях всплытия.

Из графиков, показанных на рисунке 6, также видно, что разделение противоположных полярностей продолжается после достижения активной областью максимального магнитного потока. Также, после этого момента явное ускорение или замедление активной области практически останавливается и скорость вращения начинает флуктуировать вокруг некоторой средней величины несмотря на дальнейшее увеличение ее геометрических размеров. По-видимому, к этому времени расхождение магнитных полярностей происходит симметрично относительно центра магнитной петли.

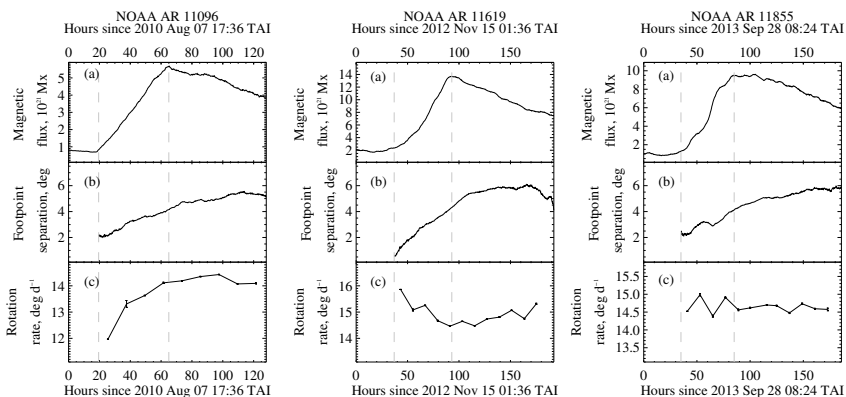


Рисунок 6 — Вариации полного магнитного потока (верхние панели), расстояния между центроидами противоположных полярностей (центральные панели) и угловой скорости вращения (нижние панели) активных областей NOAA 11096 (слева), 11619 (в середине) и 11855 (справа). Вертикальные штриховые линии показывают момент достижения максимального магнитного потока. Ошибки на нижних панелях рассчитывались как погрешность наклона аппроксимации долготы трассера линейной функцией за 12-часовой интервал.

Ускорение или замедление активной области на стадии всплытия может быть вызвано геометрическим наклоном магнитного жгута (в форме Ω -петли) к радиальному направлению в восточную или западную сторону, что часто получается в моделях формирования концентраций локальных магнитных полей в конвективной зоне. Различные расчеты предсказывают систематический наклон либо в западном, либо в восточном направлении. Результаты этого исследования показывают, что наклон может отсутствовать или быть равновероятно направленным вдоль параллелей в одном или другом направлении.

Из рисунка 6 становится понятно, что после всплытия и прохождения максимума магнитного потока скорость вращения активных областей остается практически постоянной в течение нескольких дней, однако проследить возможный тренд до конца диссипации часто не представляется возможным. Небольшие активные области, для которых доступны наблюдения от первых до последних часов их жизни, малоинформативны, поскольку погрешность измерения скорости для таких трассеров довольно высока и вариации могут быть обусловлены исключительно шумами. Следовательно, систематическое ускорение или замедление во время эволюции может быть надежно выявлено для относительно долгоживущих структур, но время наблюдения ограничено интервалом их нахождения на видимой стороне Солнца и не превышает 10-12 суток в лучшем случае. К тому же,

количество крупных трассеров ограничено просто в силу распределения размеров (или максимальных магнитных потоков) активных областей. Одним из вариантов решения этой проблемы является анализ не одного трассера в разные моменты эволюции, а многих трассеров, наблюдающихся на различных стадиях существования. Для этого можно проанализировать разность между скоростью вращения индивидуального i -го трассера ω_{sid}^i и ожидаемой скоростью вращения для данной широты, описываемой выражением 2. Положительные значения означают, что трассер вращается быстрее ожидаемой средней скорости, отрицательные – медленнее. Размер кружков на рисунке пропорционален максимальному магнитному потоку. Черная штриховая кривая показывает линейную аппроксимацию распределения. Ее отрицательный наклон подтверждает вывод о том, что активные области с большим магнитным потоком в среднем вращаются медленнее.

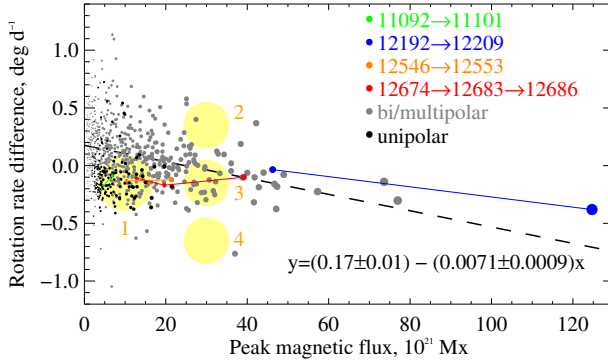


Рисунок 7 — Разность между скоростью вращения индивидуального i -го трассера ω_{sid}^i и ожидаемой скоростью вращения для данной широты, описываемую выражением 2, от максимального магнитного потока активной области. Би- и мультиполярные активные области показаны серыми кружками, униполярные – черными. Площадь кружка пропорциональна максимальному магнитному потоку. Рекуррентные активные области показаны цветными кружками, соединенными линиями, цвет на соседних оборотах сохраняется. Штриховая линия показывает наилучшую аппроксимацию распределения линейной функцией. Большой желтый круг, обозначенный цифрой 1, показывает преимущественное расположение униполярных активных областей на диаграмме. Большие желтые круги, обозначенные цифрами 2-4, показывают возможные зоны, в которых униполярные активные области концентрировались на этапах своего максимального развития (см. текст).

Цветными кружками на рисунке 7 показаны несколько идентифицированных рекуррентных активных областей, одинаковый цвет выбран для

разных оборотов. Количество таких трассеров невелико, однако заметная тенденция: магнитный поток, как и ожидается, уменьшается со временем, что приводит к смещению кружка на графике в левую сторону. В то же время, скорость вращения на соседних оборотах меняется незначительно (изменение не превышает погрешность определения) и на рисунке не наблюдается заметного смещения трассеров в вертикальном направлении. Такой результат может быть обусловлен случайным совпадением, поскольку основан только на анализе четырех активных областей. Тем не менее, он позволяет предположить, что скорость угловая вращения активных областей остается неизменной после окончания вспышки магнитного потока.

Униполярные активные области составляют более значительное подмножество из 176 объектов в общей выборке. Они показаны на рисунке 7 черными кружками. Можно видеть, что большинство этих трассеров концентрируется в нижнем левом углу диаграммы. Для удобства эта зона выделена большим желтым кругом, обозначенным на рисунке цифрой 1. Униполярные активные области являются завершающей стадией развития биполярной магнитной структуры, за время эволюции они потеряли не менее половины от своего максимального магнитного потока. На диаграмме, показанной на рисунке 7, уменьшение магнитного потока соответствует перемещению кружка в левую сторону, что наблюдается, например, для рекуррентных активных областей. Предположим, что в максимуме развития их полный магнитный поток приблизительно в два раза превышал наблюдаемый. В этом случае большинство этих трассеров концентрировалось в одном из желтых кругов на графике, обозначенными цифрами 2-4 и смещенными вправо, в сторону больших потоков. В случае, если скорость вращения активных областей уменьшилась за время эволюции, то они должны были переместиться вниз по вертикали, наиболее вероятное место их изначального расположения показано желтым кругом с цифрой 2. Аналогично, в случае относительно стабильного вращения можно ожидать их исходную концентрацию в круге с цифрой 3, а при ускорении – в круге, обозначенном цифрой 4. Анализируя рисунок 7, можно заключить, что наиболее «населенной» зоной является желтый круг с цифрой 3. Принимая во внимание, что фаза развития, на которую приходится наблюдения активной области, случайна, неизбежен вывод о том, что униполярные активные области исходно располагались в зоне круга 3, а во время диссипации их положение по вертикали практически не изменилось. Следовательно, угловая скорость вращения активных областей после окончания вспышки остается постоянной.

В четвертой главе проводится анализ электрических токов и токовой спиральности в активных областях. Магнитные поля в нижней атмосфере Солнца в общем случае находятся в непотенциальном состоянии, что связано с текущими в них электрическими токами. Наблюдения показывают, что последние выносятся из-под фотосферы вместе с всплыва-

ющим магнитным потоком. Предполагается, что энергия, расходуемая во время вспышек, черпается из так называемой свободной магнитной энергии, связанной с присутствующими в атмосфере электрическими токами. Еще одной характеристикой, неразрывно связанной с текущими в активной области электрическими токами, является спиральность. Она описывает скрученность магнитных силовых линий вокруг оси магнитного жгута. Многочисленные наблюдения показывают, что знак спиральности (закрутки) магнитных полей противоположный для северного и южного полушарий, что проявляется в форме корональных петель, волокон, хромосферных структур, солнечном ветре и в других образованиях. Эта совокупность наблюдений упоминается обычно как правило для знака спиральности в полушариях.

Вычисление электрических токов в атмосфере Солнца проводят, опираясь на измеренные величины магнитного поля:

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{j}, \quad (4)$$

где μ_0 – магнитная постоянная. Существенным ограничением является то, что магнитные поля в большинстве случаев измеряются для какой-либо определенной высоты в атмосфере, поэтому в большинстве работ ограничиваются расчетом вертикальной (радиальной) составляющей плотности тока j_z . Используя теорему Кельвина-Стокса, можно прийти к следующему выражению:

$$j_z = \frac{1}{\mu_0 s} \oint_L \vec{B}_t d\vec{r}, \quad (5)$$

где интегрирование производится по замкнутому контуру L , охватывающему часть магнитограммы площадью s , $\vec{B}_t$ – вектор поперечного магнитного поля. Токовая спиральность H_C является одной из мерой скрученности магнитного поля и может быть определена с помощью выражения

$$H_C = \int_V \vec{B} \cdot \vec{j} dV. \quad (6)$$

Обычно рассчитывают лишь часть H_C , связанную с вертикальным (радиальным) направлением (не z -компоненту, поскольку спиральность является скаляром, а не вектором) в плоскости фотосферы $H_C^z = \int_S B_z j_z dS$. Естественно, что такая процедура является крайне некорректной, но получаемая величина все же имеет отношение к состоянию магнитного поля в активной области. Одним из аргументов в пользу этого утверждения является соответствие знака интегральной токовой спиральности эмпирическому правилу полушарий.

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. Для

более подробного изучения этого вопроса был проведен еще один эксперимент. Было выбрано 99 всплывающих активных областей, наблюдавшихся с 2010 по 2018 гг. Морфологически все объекты представляли собой простые магнитные диполи (класс β согласно классификации Маунт-Вилсон). Согласно критериям отбора, после достижения максимального магнитного потока, объект должен был находиться не дальше 60° от центрального меридиана в течение трех дней, что необходимо для изучения его дальнейшей эволюции. Из исходной выборки было выделено 72 активных области, магнитный поток в которых монотонно увеличивался на этапе всплытия и убывал на этапе диссипации. Вместе с полным магнитным потоком рассчитывалось расстояние между центрами противоположных полярностей и два значения спиральности – в моменты достижения максимального магнитного потока и максимального размера, затем знак спиральности сопоставлялся с широтой.

Результаты анализа показали, что к моменту окончания всплытия направление закрутки магнитных силовых линий соответствует ожидаемому согласно правилу полушарий только в 36 (50%) активных областях, т.е. ровно в половине выборки. Во время достижения максимального расстояния между центрами противоположных полярностей, их количество увеличивается до 49 из 72, т.е. до 68%. Дальнейший анализ эволюции спиральности для этой выборки был затруднен из-за ограниченности времени нахождения активных областей на видимой стороне диска. С другой стороны, возможно исследовать заведомо «старые» объекты, которыми являются униполярные магнитные структуры (класс α согласно классификации Маунт-Вилсон). Расчеты знака спиральности были выполнены для 21 активной области такой морфологии. Было установлено, что 20 из них, т.е. 95%, показывают направление закрутки в соответствии с правилом полушарий. Из исследования можно сделать вывод, что ожидаемый знак усредненной спиральности возникает в активной области не на этапе всплытия, а во время последующей эволюции.

В работе также был проведен анализ связи нормированной скорости нарастания магнитного потока во всплывающих активных областях $R_n = R_{av}/\Phi_{max}$ и величиной скрученности в них (англ. twist). 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, хотя и не выявлено однозначной связи между величинами.

Сопоставление карт токовой спиральности, рассчитанных по данным различных инструментов, достаточно хорошо согласуются, что позволяет говорить о том, что они показывают реальное распределение этого фи-

зического параметра по активной области, а не случайные структуры, связанные с ошибками измерений и некорректностью методов для расчета. Пространственное распределение H_C^z фактически определяется распределением электрических токов, поскольку они более мелкомасштабны по сравнению с магнитными элементами. В данной работе был впервые проведен анализ структурных функций токовой спиральности. Метод описан в работах [Frisch, 1995; Abramenko и др., 2002; Abramenko, 2005]. Функции представляют собой статистические моменты степени q приращения любого двумерного (для данного случая) поля:

$$S_q(r) = \langle |u(\vec{x} + \vec{r}) - u(\vec{x})|^q \rangle, \quad (7)$$

где $\vec{x}$ – точка в пространстве и $\vec{r}$ – вектор разности между двумя точками, между которыми измеряется приращение функции $u(\vec{x})$. В работе вычислялась флэтнесс-функция

$$F(r) = S_6(r)/(S_2(r))^3 \propto r^{-\kappa}. \quad (8)$$

Для перемежаемого поля $F(r)$ связана степенным законом с пространственным масштабом r . В двойном логарифмическом масштабе наклон κ флэтнесс-функции в некотором интервале Δr , где $F(r)$ линейна, характеризует перемежаемость поля: чем он выше, тем более сложная пространственная структура у поля [Abramenko, 2005]. Для исследования использовались векторные магнитограммы, полученные инструментом SDO/HMI. Были выбраны три активные области (NOAA 11158, 12494 и 12673), для которых рассчитывался наклон флэтнесс-функций поперечного и продольного магнитных полей, токовой спиральности. Анализ показал, что характерный линейный размер структур токовой спиральности редко превышает 10 Мм. Также для каждой активной области измерялся ее полный магнитный поток $\Phi(t)$ и дисбаланс токовой спиральности (англ. net current helicity) как интеграл H_C^z по всей активной области. Кривые изменения величин для активных областей NOAA 1158 и 12494 показаны на рисунке 8.

Все три исследованные активные области имели одну общую черту – всплытие нового магнитного потока в непосредственной близости от уже существующей магнитной структуры. В каждом случае за 10-15 часов до события в кривой изменения наклона флэтнесс-функции токовой спиральности наблюдалось резкий «провал», абсолютное значение $|\kappa_{H_C}|$ увеличивалось в 2-3 раза. Интересно, что в эти моменты не наблюдалось каких-либо существенных вариаций во флэтнесс-функциях продольного и поперечного магнитных полей. Возрастание наклона κ_{H_C} означает увеличение перемежаемости или сложности пространственной структуры токовой спиральности. Сама интегральная величина H_C остается неизменной, что говорит именно об изменении ее распределения по фотосфере. Визуальный анализ магнитограмм показал, что изменения во флэтнесс-функции токовой спи-

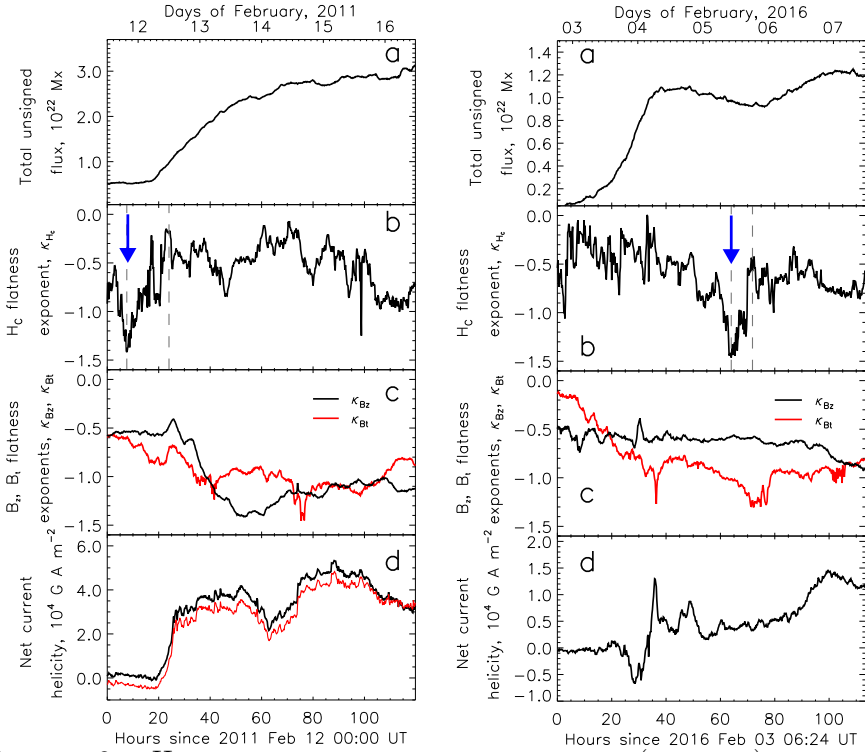


Рисунок 8 — Изменение полного магнитного потока (панель а), наклонов флэтнесс-функции токовой спиральности (панель b), продольного (панель с, черная кривая) и поперечного (панель с, красная кривая) магнитных полей, дисбаланса токовой спиральности для активных областей NOAA 11158 (слева) и 12494 (справа). На панели (d) слева красной кривой показан дисбаланс токовой спиральности, получаемый в заголовках FITS-файлов серии SHARP данных SDO/HMI. Синими стрелками на панелях (b) показаны моменты резкого увеличения наклона флэтнесс-функции токовой спиральности перед всплытием нового магнитного потока в активной области.

ральности происходят еще до того, как на поверхности обнаруживаются первые элементы нового всплывающего магнитного потока.

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, резкие изменения структуры токовой спиральности может быть диагностическим средством, свидетельствующим о скором всплывании нового магнитного в уже сформированной активности области. Такие события часто приводят к возникновению вспышечных событий.

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. Исследуемая величина также называется среднее магнитное поле B_{SMMF} (англ. solar mean magnetic field) или магнитное поле Солнца-как-звезды. Исследования показывают, что его знак коррелирует с полярностью межпланетного магнитного поля, измеряемого на орбите Земли.

В данном исследовании проводился анализ вклада различных магнитных структур, а именно активных областей, их крупных диссипирующих остатков и участков спокойного Солнца в среднее магнитное поле. Для расчета B_{SMMF} проводилось усреднение магнитограмм полного диска SDO/HMI. Сравнение среднего магнитного поля B_{SMMF} , полученного по в данной работе и измеренного обсерваторией WSO, показало хорошее согласие. Для оценки вклада различных магнитных структур в B_{SMMF} на магнитограммах полного диска с помощью разработанного алгоритма выделялись отдельные магнитные элементы, плотность магнитного потока в которых превышала шумовой порог инструмента. В зависимости полного магнитного потока структур, они разделялись на активные области и их диссипирующие остатки. Полагалось, что участки вне структур принадлежат спокойному Солнцу. Далее отдельно рассчитывался суммарный магнитный поток (с учетом знака) от каждого типа элементов, который нормировался на всю площадь солнечного диска. Иными словами, вычислялся дисбаланс магнитного потока, который создают структуры определенного типа в отсутствие других магнитных элементов.

В общей сложности было обработано 2392 магнитограммы полного диска за временной интервал с 2010 по 2016 годы. Было установлено, что вклад спокойного Солнца в среднее магнитное поле составляет 17% за весь рассмотренный интервал наблюдений, тогда как суммарная доля активных областей и их остатков достигает 83%. Суммарная площадь магнитных элементов, плотность потока в которых превышает пятикратный уровень шума, не превосходила 6% от площади диска в течение всего проанализированного интервала. При изменении порога для разделения пикселей на принадлежащие магнитным элементам и спокойному Солнцу ситуация не менялась значительно: при любых разумных значениях порога суммарная площадь элементов не превышала 10% от площади диска. Следовательно, среднее магнитное поле или дисбаланс магнитного потока по всему видимому диску Солнца определяется преимущественно локальными маг-

нитными структурами, суммарная площадь которых не превышает 10% от площади диска. Эти магнитные элементы – в основном остатки активных областей, которые в виде небольших локальных концентраций магнитного потока распределяются на большие площади диффузией, меридиональной циркуляцией и дифференциальным вращением.

В заключении кратко приводятся основные выводы исследования.

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. Исходя из полученных результатов, можно предположить следующую качественную картину их подповерхностной эволюции:

- На некоторой глубине в конвективной зоне магнитный жгут, формирующий впоследствии активную область в атмосфере, представляет собой относительно когерентную структуру. 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. Зависимость между скоростью нарастания магнитного потока и максимальным магнитным потоком описывается степенным законом с показателем экспоненты около 0.5, что может объясняться примитивной моделью подъема магнитной трубки прямоугольного сечения через границу конвективная зона–фотосфера с постоянной линейной скоростью. Такое согласие хоть и косвенно, но указывает на правомерность рассмотрения магнитного жгута под поверхностью Солнца как уже достаточно когерентной структуры.
- 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. Крупные магнитные элементы в последнем случае, тем не менее, наиболее часто объединяются в единые ведущую и хвостовую полярности. Такая картина, скорее всего, свидетельствует о фрагментации вершины поднимающегося магнитного жгута, которая исходно представляла собой «монолитную» структуру. В этом случае отдельные его составляющие последовательно появляются на поверхности, что и наблюдается как всплытие нескольких магнитных диполей. Фрагментация может быть связана с взаимодействием магнитного поля и турбулентных течений плазмы в верхних слоях конвективной зоны.

- Магнитные жгуты не показывают систематического подповерхностного наклона своей оси в восточном или западном направлении, что определяется по движению на поверхности ведущей и хвостовой полярностей всплывающих активных областей. Указанный наклон должен возникать в результате воздействия ряда механизмов на поднимающуюся через конвективную зону магнитную петлю, что получено в ряде модельных расчетов и объясняется, в первую очередь, эффектом Кориолиса. Равновероятно наблюдается как наклон в одном либо в другом направлении, так и его отсутствие (симметричное расхождение ведущей и хвостовой полярности относительно места первого появления магнитного жгута на поверхности).
- Угловая скорость вращения активных областей на поверхности Солнца превосходит скорость движения плазмы, определяемую по измерению доплеровских смещений спектральных линий. Крупные активные области показывают тенденцию вращаться медленнее, чем небольшие, при этом угловая скорость остается постоянной после окончания всплытия в течение всей последующей эволюции магнитной структуры. Учитывая, что магнитные силовые линии являются замкнутыми и каким-либо образом продолжают внутри конвективной зоны, это наблюдение можно интерпретировать как влияние подповерхностного магнитного «каркаса» активной области на ее движение на поверхности. общепринятое объяснение зависимости угловой скорости вращения от размера активной области все еще не дано, однако может быть связано с вариациями скоростей плазмы с глубиной.
- 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 быстрой скорости нарастания 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. В целом, результаты работы показывают, что роль эффекта Кориолиса в формировании и эволюции магнитных жгутов внутри конвективной зоны преувеличена в модельных расчетах; существенно большее влияние может оказывать взаимодействие магнитных полей с турбулентными потоками плазмы.

- Скорое появление нового магнитного потока вблизи уже существующей активной области может быть обнаружено по изменению пространственной структуры электрических вертикальных токов последней, что проявляется как резкое увеличение перемежаемости элементов токовой спиральности. По-видимому, это связано с подповерхностным взаимодействием магнитных жгутов через токовые системы, генерируемые магнитными жгутами.

Результаты исследования могут быть использованы при разработке моделей генерации и эволюции магнитных полей в конвективной зоне и атмосфере Солнца. В дальнейшем необходимо продолжить поиск закономерностей, связанных с такими малопонятными, но в то же время исключительно важными для понимания солнечного динамо явлениями как активные долготы, торсионные колебания, протяженный 22-летний солнечный цикл. Также все еще отсутствует консенсус о том, на какой глубине в конвективной зоне происходит формирование магнитных жгутов, что также требует проведения новых исследований. Перспективным представляется более подробный анализ роли электрических токов в эволюции магнитных полей, который может быть выполнен, в том числе, при помощи нового инструмента для спектрополяриметрии Солнца, разработанного и созданного в КРАО РАН в рамках данной работы.

Список литературы

1. *Abramenko V. I.* и др. Scaling Behavior of Structure Functions of the Longitudinal Magnetic Field in Active Regions on the Sun // *Astrophysical Journal*. — 2002. — Сент. — Т. 577, № 1. — С. 487—495.
2. *Abramenko V. I.* Multifractal Analysis Of Solar Magnetograms // *Solar Physics*. — 2005. — May. — Vol. 228, no. 1/2. — P. 29—42.
3. *Augustson K.* et al. Grand Minima and Equatorward Propagation in a Cycling Stellar Convective Dynamo // *Astrophysical Journal*. — 2015. — Aug. — Vol. 809, no. 2. — P. 149.
4. *Babcock H. W.* The Topology of the Sun's Magnetic Field and the 22-Year Cycle. // *Astrophysical Journal*. — 1961. — Mar. — Vol. 133. — P. 572.
5. *Brandenburg A., Kleeorin N., Rogachevskii I.* Self-assembly of Shallow Magnetic Spots through Strongly Stratified Turbulence // *Astrophysical Journal Letters*. — 2013. — Oct. — Vol. 776, no. 2. — P. L23.
6. *Caligari P., Moreno-Insertis F., Schussler M.* Emerging Flux Tubes in the Solar Convection Zone. I. Asymmetry, Tilt, and Emergence Latitude // *Astrophysical Journal*. — 1995. — Mar. — Vol. 441. — P. 886.
7. *Cally P. S., Moradi H.* Seismology of the wounded Sun // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2013. — Nov. — Vol. 435, no. 3. — P. 2589—2597.

8. *Carrington R. C.* On the Distribution of the Solar Spots in Latitudes since the Beginning of the Year 1854, with a Map // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 1858. — Nov. — Vol. 19. — P. 1—3.
9. *Charbonneau P.* Dynamo models of the solar cycle // *Living Reviews in Solar Physics*. — 2020. — Dec. — Vol. 17, no. 1. — P. 4.
10. *Charbonneau P., Sokoloff D.* Evolution of Solar and Stellar Dynamo Theory // *Space Science Reviews*. — 2023. — Aug. — Vol. 219, no. 5. — P. 35.
11. *Chen F., Rempel M., Fan Y.* Emergence of Magnetic Flux Generated in a Solar Convective Dynamo. I. The Formation of Sunspots and Active Regions, and The Origin of Their Asymmetries // *Astrophysical Journal*. — 2017. — Sept. — Vol. 846, no. 2. — P. 149.
12. *Choudhuri A. R., Gilman P. A.* The Influence of the Coriolis Force on Flux Tubes Rising through the Solar Convection Zone // *Astrophysical Journal*. — 1987. — May. — Vol. 316. — P. 788.
13. *D'Silva S., Choudhuri A. R.* A theoretical model for tilts of bipolar magnetic regions // *Astronomy and Astrophysics*. — 1993. — May. — Vol. 272. — P. 621.
14. *Dasi-Espuig M. et al.* Sunspot group tilt angles and the strength of the solar cycle // *Astronomy and Astrophysics*. — 2010. — July. — Vol. 518. — A7.
15. *Domingo V., Fleck B., Poland A. I.* The SOHO Mission: an Overview // *Solar Physics*. — 1995. — Dec. — Vol. 162, no. 1/2. — P. 1—37.
16. *Fan Y., Fang F.* A Simulation of Convective Dynamo in the Solar Convective Envelope: Maintenance of the Solar-like Differential Rotation and Emerging Flux // *Astrophysical Journal*. — 2014. — July. — Vol. 789, no. 1. — P. 35.
17. *Frisch U.* Turbulence. The legacy of A.N. Kolmogorov. — 1995.
18. *Gizon L. et al.* Helioseismology of Sunspots: A Case Study of NOAA Region 9787 // *Space Science Reviews*. — 2009. — Apr. — Vol. 144, no. 1—4. — P. 249—273.
19. *Gizon L. et al.* Erratum: Erratum to: Helioseismology of Sunspots: A Case Study of NOAA Region 9787 // *Space Science Reviews*. — 2010. — Oct. — Vol. 156, no. 1—4. — P. 257—258.
20. *Gizon L., Birch A. C.* Local Helioseismology // *Living Reviews in Solar Physics*. — 2005. — Dec. — Vol. 2, no. 1. — P. 6.
21. *Hale G. E., Nicholson S. B.* The Law of Sun-Spot Polarity // *Astrophysical Journal*. — 1925. — Nov. — Vol. 62. — P. 270.
22. *Hale G. E. et al.* The Magnetic Polarity of Sun-Spots // *Astrophysical Journal*. — 1919. — Apr. — Vol. 49. — P. 153.
23. *Hazra G. et al.* Mean Field Models of Flux Transport Dynamo and Meridional Circulation in the Sun and Stars // *Space Science Reviews*. — 2023. — Aug. — Vol. 219, no. 5. — P. 39.

24. *Howard R., Harvey J.* Spectroscopic Determinations of Solar Rotation // Solar Physics. — 1970. — Apr. — Vol. 12, no. 1. — P. 23—51.
25. *Howe R. et al.* Dynamic Variations at the Base of the Solar Convection Zone // Science. — 2000. — Mar. — Vol. 287, no. 5462. — P. 2456—2460.
26. *Käpylä P. J. et al.* Magnetic flux concentrations from turbulent stratified convection // Astronomy and Astrophysics. — 2016. — Apr. — Vol. 588. — A150.
27. *Kosugi T. et al.* The Hinode (Solar-B) Mission: An Overview // Solar Physics. — 2007. — June. — Vol. 243, no. 1. — P. 3—17.
28. *Krause F., Raedler K. H.* Mean-field magnetohydrodynamics and dynamo theory. — 1980.
29. *Lamb D. A.* Measurements of Solar Differential Rotation and Meridional Circulation from Tracking of Photospheric Magnetic Features // Astrophysical Journal. — 2017. — Feb. — Vol. 836, no. 1. — P. 10.
30. *Martin S. F.* Observations key to understanding solar cycles: a review // Frontiers in Astronomy and Space Sciences. — 2024. — Feb. — Vol. 10. — P. 1177097.
31. *Maunder E. W.* The sun and sun-spots, 1820-1920 // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 1922. — June. — Vol. 82. — P. 534—543.
32. *Moreno-Insertis F., Schuessler M., Ferriz-Mas A.* Storage of magnetic flux tubes in a convective overshoot region // Astronomy and Astrophysics. — 1992. — Oct. — Vol. 264, no. 2. — P. 686—700.
33. *Nelson N. J. et al.* Buoyant Magnetic Loops in a Global Dynamo Simulation of a Young Sun // Astrophysical Journal Letters. — 2011. — Oct. — Vol. 739, no. 2. — P. L38.
34. *Newton H. W., Nunn M. L.* The Sun's rotation derived from sunspots 1934-1944 and additional results // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 1951. — Jan. — Vol. 111. — P. 413.
35. *Obridko V. N., Shibalova A. S., Sokoloff D. D.* The extended solar cycle and asymmetry of the large-scale magnetic field // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2023. — July. — Vol. 523, no. 1. — P. 982—990.
36. *Parker E. N.* The generation of magnetic fields in astrophysical bodies. X. Magnetic buoyancy and the solar dynamo. // Astrophysical Journal. — 1975. — May. — Vol. 198. — P. 205—209.
37. *Parker E. N.* Hydromagnetic Dynamo Models. // Astrophysical Journal. — 1955a. — Sept. — Vol. 122. — P. 293.
38. *Parker E. N.* The Formation of Sunspots from the Solar Toroidal Field. // Astrophysical Journal. — 1955b. — Mar. — Vol. 121. — P. 491.
39. *Pesnell W. D., Thompson B. J., Chamberlin P. C.* The Solar Dynamics Observatory (SDO) // Solar Physics. — 2012. — Jan. — Vol. 275, no. 1/2. — P. 3—15.

40. *Petrovay K.* Area-Weighting of Sunspot Group Positions and Proper Motion Artifacts // IAU Colloq. 141: The Magnetic and Velocity Fields of Solar Active Regions. Vol. 46 / ed. by H. Zirin, G. Ai, H. Wang. — 01/1993. — P. 123. — (Astronomical Society of the Pacific Conference Series).
41. *Rempel M.* Thermal properties of magnetic flux tubes. II. Storage of flux in the solar overshoot region // Astronomy and Astrophysics. — 2003. — Jan. — Vol. 397. — P. 1097—1107.
42. *Scherrer P. H.* et al. The Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) Investigation for the Solar Dynamics Observatory (SDO) // Solar Physics. — 2012. — Jan. — Vol. 275, no. 1/2. — P. 207—227.
43. *Schou J.* et al. Design and Ground Calibration of the Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) Instrument on the Solar Dynamics Observatory (SDO) // Solar Physics. — 2012. — Jan. — Vol. 275, no. 1/2. — P. 229—259.
44. *Snodgrass H. B.* Separation of large-scale photospheric Doppler patterns // Solar Physics. — 1984. — Aug. — Vol. 94, no. 1. — P. 13—31.
45. *Spruit H. C.* Motion of magnetic flux tubes in the solar convection zone and chromosphere. // Astronomy and Astrophysics. — 1981. — May. — Vol. 98. — P. 155—160.
46. *Stein R. F., Nordlund Å.* On the Formation of Active Regions // Astrophysical Journal Letters. — 2012. — July. — Vol. 753, no. 1. — P. L13.
47. *Tripathy S.* Seismology of active regions: Current status and perspectives // Frontiers in Astronomy and Space Sciences. — 2023. — Mar. — Vol. 10. — P. 1091777.
48. *Ulrich R. K.* et al. Solar Rotation Measurements at MT.WILSON - Part Five // Solar Physics. — 1988. — Sept. — Vol. 117, no. 2. — P. 291—328.
49. *van Ballegooijen A. A.* The overshoot layer at the base of the solar convective zone and the problem of magnetic flux storage. // Astronomy and Astrophysics. — 1982. — Sept. — Vol. 113. — P. 99—112.
50. *van Driel-Gesztelyi L., Green L. M.* Evolution of Active Regions // Living Reviews in Solar Physics. — 2015. — Dec. — Vol. 12, no. 1. — P. 1.
51. *Vasil G. M.* et al. The solar dynamo begins near the surface // Nature. — 2024. — May. — Vol. 629, no. 8013. — P. 769—772.
52. *Wang Y. M., Nash A. G., Sheeley Jr. N. R.* Magnetic Flux Transport on the Sun // Science. — 1989. — Aug. — Vol. 245, no. 4919. — P. 712—718.
53. *Weber M. A.* et al. Understanding Active Region Origins and Emergence on the Sun and Other Cool Stars // Space Science Reviews. — 2023. — Dec. — Vol. 219, no. 8. — P. 63.
54. *Wilson P. R.* et al. The extended solar activity cycle // Nature. — 1988. — June. — Vol. 333, no. 6175. — P. 748—750.

Куценко Александр Сергеевич

Локальные магнитные поля на Солнце

Автореф. дис. на соискание ученой степени доктора физ.-мат. наук

Подписано в печать _____._____._____. Заказ № _____

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Типография _____