

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Ордена Трудового Красного Знамени

Институт солнечно-земной физики

Сибирского отделения

Российской академии наук

На правах рукописи

УДК 523.98



Хлыстова Анна Иннокентьевна

**ТЕЧЕНИЯ ПЛАЗМЫ ПРИ ПОЯВЛЕНИИ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ
В ФОТОСФЕРЕ СОЛНЦА**

Специальность 01.03.03 – физика Солнца

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Иркутск - 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Ордена Трудового Красного Знамени Институте солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук.

Научный руководитель:

Григорьев Виктор Михайлович, доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ордена Трудового Красного Знамени Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, руководитель научного направления по физике Солнца.

Официальные оппоненты:

Обридко Владимир Нухимович, доктор физико-математических наук, профессор по специальности «Физика Солнца», Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук, главный научный сотрудник.

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

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория Российской академии наук.

Защита состоится «___» _____ 2019 г. в ___ часов на заседании диссертационного совета Д.003.034.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Ордена Трудового Красного Знамени Институте солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова 126а, а/я 291, ИСЗФ СО РАН.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Ордена Трудового Красного Знамени Института солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук и на сайте <http://iszf.irk.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 2019 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

кандидат физико-математических наук



В.И. Поляков

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

Солнечные магнитные поля генерируются в конвективной зоне. Под действием магнитной плавучести, а также восходящих конвективных течений магнитные поля выходят на поверхность в форме Ω -образных петель и формируют активные области. Процесс возникновения активной области затрагивает все слои солнечной атмосферы: в фотосфере появляются темные межгранульные линии, факельные площадки, поры и пятна; в хромосфере возникают флоккулы и арочные волоконные системы; в короне формируются яркие петли. В настоящее время сформирована достаточно полная феноменологическая картина возникновения и развития активных областей на всех уровнях атмосферы Солнца и хорошо изучены закономерности появления активных областей, отражающие глобальные свойства солнечных магнитных полей.

Активные области являются основным источником таких высокоэнергичных явлений, как вспышки и корональные выбросы массы. Данные события изменяют состояние межпланетной среды и определяют космическую погоду. Понимание физических механизмов, лежащих в основе формирования активных областей, является важным аспектом прогноза экстремальных событий, способных оказать влияние на состояние околоземного пространства.

Выход магнитных потоков, образующих активные области, является частью циклического изменения солнечной активности. В результате этого процесса происходит транспортировка магнитного потока от места генерации до солнечной поверхности. Выходящие на поверхность магнитные поля несут косвенную информацию о процессах, протекающих в недрах Солнца, недоступных для непосредственного наблюдения. Поэтому изучение начальной стадии развития активных областей представляет особый интерес. Данная диссертационная работа содержит результаты исследования фотосферных течений плазмы на начальной стадии выхода магнитных потоков активных областей,

имеющих разные пространственные масштабы и положение на диске Солнца.

В проведенных ранее исследованиях рассматривались фотосферные течения плазмы в активных областях, возникающих в центральной части солнечного диска. Вертикальные течения плазмы исследовались по доплеровским измерениям скоростей. Горизонтальные течения определялись косвенно по перемещению трассеров, таких как магнитные элементы, поры, пятна и гранулы. В диссертации впервые исследованы горизонтальные течения плазмы по измерениям доплеровских скоростей в активных областях, образующихся на краю солнечного диска.

Течения плазмы, сопровождающие выход магнитного потока на солнечную поверхность, могут зависеть от состояния этого магнитного потока в солнечных недрах. В связи с этим сопоставление наблюдательных данных с результатами, полученными с использованием численных магнитогидродинамических (МГД) моделей, способствует пониманию физического состояния магнитного потока в подфотосферных слоях. В диссертационной работе представлен анализ МГД-моделей с целью изучения механизмов, лежащих в основе наблюдаемых течений фотосферной плазмы, и определения физического состояния выходящих магнитных потоков в солнечных недрах.

Цель и задачи работы

Целью работы является исследование фотосферных течений плазмы на начальной стадии развития активных областей.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Поиск возникающих активных областей разных пространственных масштабов и с разным положением на диске Солнца.
2. Разработка метода и программ диагностики выходящих магнитных потоков.
3. Исследование динамики магнитного поля и фотосферных течений плазмы на начальной стадии формирования активных областей.

4. Изучение зависимостей скоростей течений плазмы и параметров магнитного поля при появлении активных областей.
5. Исследование горизонтальных течений плазмы по измерениям доплеровских скоростей в активных областях, возникающих вблизи солнечного лимба.
6. Сопоставление полученных результатов с современными теоретическими моделями.

Научная новизна работы

1. Разработан комплексный метод определения характеристик выходящих магнитных потоков и скоростей движения замагниченной плазмы.
2. На большом наблюдательном материале изучена динамика магнитного поля и плазмы на начальной стадии появления активных областей.
3. Получена центрোলимбовая зависимость отрицательных доплеровских скоростей на ранней стадии образования активных областей в фотосфере Солнца.
4. Впервые по доплеровским измерениям скоростей исследованы горизонтальные течения плазмы, сопровождающие появление активных областей в фотосфере Солнца.
5. Обнаружен усиленный подъем фотосферной плазмы при появлении активных областей разных пространственных масштабов.

Научная и практическая значимость работы

1. Результаты исследования фотосферных течений плазмы на начальной стадии формирования активных областей представляют интерес для специалистов, развивающих методы локальной гелиосейсмологии на основе детектирования всплытия магнитных потоков на подфотосферном уровне.

2. Полученные результаты способствуют развитию реалистичных теоретических моделей выхода магнитного потока из конвективной зоны в атмосферу Солнца и формирования активных областей.
3. Разработанный метод определения характеристик магнитных потоков и скоростей движения замагниченной плазмы в дальнейшем может быть использован для исследования других свойств выходящих магнитных потоков.

Методология и методы исследования

Результаты, представленные в диссертации, получены из анализа данных солнечного космического телескопа SOHO/MDI. К данным применялись методы специальной обработки и пространственного совмещения. В работе использовались методы расчета физических параметров выходящих магнитных потоков и сопровождающих их течений фотосферной плазмы, а также метод регрессионного анализа. Полученные наблюдательные результаты сопоставлялись с результатам моделирования.

Положения, выносимые на защиту

1. Получены центрolimбовые зависимости наибольших значений отрицательных доплеровских скоростей, которые показывают, что на начальной стадии образования активных областей горизонтальные скорости растекания плазмы превосходят вертикальные скорости подъема.
2. Найдена квадратичная зависимость между скоростью роста и плотностью магнитного потока возникающих активных областей. Полученная зависимость объясняется действием силы магнитной плавучести, которая пропорциональна квадрату плотности магнитного потока.
3. Обнаружены сильные горизонтальные расходящиеся течения фотосферной плазмы на начальной стадии формирования активных

областей. Найдено, что наибольшие значения отрицательной и положительной доплеровской скорости связаны квадратично со скоростью роста и линейно с плотностью выходящих магнитных потоков.

4. Обнаружен усиленный подъем фотосферной плазмы на начальной стадии формирования большой и малых активных областей. Сопоставление наблюдательных данных с результатами, полученными в рамках идеализированной МГД-модели, показало, что до выхода магнитного потока на солнечную поверхность движущей силой наблюдаемых течений плазмы является градиент газового давления, после появления магнитного потока в фотосфере Солнца действует градиент магнитного давления.

Достоверность результатов

Достоверность представленных в диссертации результатов обеспечивается использованием регулярных рядов данных SOHO/MDI, которые согласуются с другими данными наблюдений, применением современных методов анализа наблюдательного материала, сравнением полученных наблюдательных результатов с результатами современных теоретических исследований. Результаты диссертации были опубликованы в ведущих рецензируемых журналах и представлены на российских и международных конференциях.

Апробация работы

Результаты диссертации докладывались и обсуждались на международных научных конференциях «12th European Solar Physics Meeting» (Фрайбург, Германия, 2008 г.), «13th European Solar Physics Meeting» (Родос, Греция, 2011 г.), «15th European Solar Physics Meeting» (Будапешт, Венгрия, 2017 г.), «The Second VarSITI General Symposium» (Иркутск, 2017 г.), Всероссийской конференции «Солнечно-земная физика», посвященной 50-летию создания ИСЗФ СО РАН (Иркутск,

2010 г.), Международной Байкальской молодежной научной школе по фундаментальной физике (Иркутск, 2011 г.). Доклад по результатам диссертационной работы был сделан на семинаре отдела физики Солнца ИСЗФ СО РАН (Иркутск, 2018 г.).

Личный вклад автора

Представленные в диссертации результаты были получены автором самостоятельно и в сотрудничестве с коллегами из ИСЗФ СО РАН и НАОЈ (Национальная астрономическая обсерватория Японии, Токио, Япония). В совместных исследованиях автор выполнял обработку и анализ данных, а также принимал участие в обсуждении полученных результатов.

Публикации по теме диссертации

По теме диссертации опубликовано 5 статей (список приведен в конце автореферата) в рецензируемых научных журналах, входящих в базы данных международных систем цитирования и рекомендованных ВАК для публикации результатов кандидатских диссертаций.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, приложения и списка цитируемой литературы, содержащего 223 источника. Объем работы составляет 140 страниц, включая 31 рисунок и 14 таблиц.

Содержание работы

Во **Введении** обоснована актуальность выбранной темы, определены цели и задачи работы, изложены научная новизна и практическое значение полученных результатов, сформулированы выносимые на защиту положения, дано краткое описание работы.

Глава 1 представляет собой обзор проведенных ранее исследований. Здесь изложены наблюдательные аспекты появления активных областей в атмосфере Солнца. Описаны механизмы образования сильных магнитных полей, процессы их всплытия внутри конвективной зоны и выхода в атмосферу Солнца. Приведены основные результаты теоретических и наблюдательных исследований течений плазмы, сопровождающих формирование активных областей.

Глава 2 содержит общее описание инструмента MDI, установленного на борту орбитальной обсерватории SOHO. В главе описаны принципы измерения магнитных полей, скоростей и яркости континуума на SOHO/MDI. Изложена методика обработки используемых данных и расчета анализируемых параметров, даны характеристика исследуемых активных областей и критерии их выбора.

В работе использовались фотосферные магнитограммы, доплерограммы и изображения в континууме полного диска Солнца SOHO/MDI. Временное разрешение данных 1 мин и непрерывность наблюдений дают возможность детально проследить развитие активных областей с первых минут их возникновения. Пространственное разрешение данных 4'' является достаточным для исследования структур магнитного поля и течений плазмы в активных областях.

Из временной последовательности данных полного диска Солнца выделялся участок с возникающей активной областью с учетом ее смещения вследствие солнечного вращения. Точное пространственное совмещение магнитограмм, доплерограмм и изображений в континууме достигалось за счет выделения из данных, полученных в одно время, фрагментов с одинаковыми гелиографическими координатами. При обработке доплерограмм устранялся вклад дифференциального

вращения Солнца и других факторов, искажающих сигнал скорости. На доплерограммах SOHO/MDI отрицательная скорость соответствует синему доплеровскому сдвигу, или движению плазмы к наблюдателю, положительная — красному доплеровскому сдвигу, или движению плазмы от наблюдателя.

Рассмотрены 224 активные области, возникшие на видимой стороне солнечного диска. Выбранные объекты имели разные величины магнитных потоков и положение на диске Солнца. В зависимости от максимальной величины полного беззнакового магнитного потока, активные области разделены на три группы: эфемерные, малые и большие. По расстоянию от центра солнечного диска в начале формирования активные области также разделены на три группы: находящиеся в центральной части, в средней части и вблизи края солнечного диска. В центральной части диска мы имеем дело с вертикальной составляющей протекающих процессов, вблизи края диска — с горизонтальной.

В работе выполнялось сопоставление параметров, характеризующих: положение возникающих активных областей на диске Солнца; развитие выходящих магнитных потоков и динамику формирующихся при этом течений плазмы. Расчет физических параметров проводился внутри участка с выходом магнитного потока. Анализ взаимного расположения магнитных полей, течений плазмы и пор выполнялся с помощью визуализации данных и наложения изолиний. Программы по обработке данных и проведению расчетов написаны диссертантом на основе библиотек IDL.

Глава 3 содержит основные результаты диссертации. В ней описаны найденные зависимости скоростей течений плазмы и параметров магнитного поля на начальной стадии формирования активных областей в фотосфере Солнца. Изложены результаты исследования горизонтальных расходящихся течений фотосферной плазмы, возникающих на начальной стадии развития активных областей. Приведены результаты исследования усиленных восходящих течений плазмы при появлении активных областей в фотосфере Солнца, и дана интерпретация наблюдаемых явлений в рамках современных теоретических моделей.

Раздел 3.1 посвящен изучению зависимостей скоростей течений плазмы и параметров магнитного поля на начальной стадии появления активных областей. В малых и больших активных областях исследуемые параметры определялись в первые 12 ч развития, в эфемерных активных областях — в период от начала до максимума развития. Скорости течений плазмы при выходе магнитных потоков активных областей сравниваются со скоростями конвективных течений спокойного Солнца.

Для эфемерных, малых и больших активных областей были построены центрoлибровые зависимости наибольших значений отрицательных доплеровских скоростей (движение плазмы к наблюдателю) (Рисунок 1). На графиках каждая точка характеризует наибольшую отрицательную доплеровскую скорость на начальной стадии развития одной активной области. Гелиоцентрический угол θ соответствует удаленности активной области от центра солнечного диска: при $\theta < 25^\circ$ мы имеем дело с вертикальной составляющей течений плазмы, при $\theta > 50^\circ$ — с горизонтальной. Полученные центрoлибровые зависимости показывают, что на начальной стадии формирования активных областей горизонтальные скорости растекания фотосферной плазмы в 2–3 раза превышают вертикальные скорости подъема. Найденные корреляционные отношения указывают на сильную связь между сопоставляемыми параметрами. В целом скорости течений плазмы при появлении активных областей превышают скорости конвективных течений спокойного Солнца.

Как видно из Рисунка 1, доплеровские скорости горизонтальных течений плазмы в возникающих активных областях существенно отклоняются от среднего. Чтобы понять, с чем это связано, в активных областях, формирующихся вблизи лимба, наибольшие значения положительных и отрицательных доплеровских скоростей были сопоставлены с параметрами выходящих магнитных потоков (Рисунок 2). Полученные зависимости показали, что в начале развития активных областей скорости горизонтальных течений плазмы V_{\max} связаны квадратично со скоростью роста $d\Phi/dt$ и линейно с плотностью B_{\max} выходящих магнитных потоков. Найденные связи характерны для эфемерных, малых и больших активных областей.

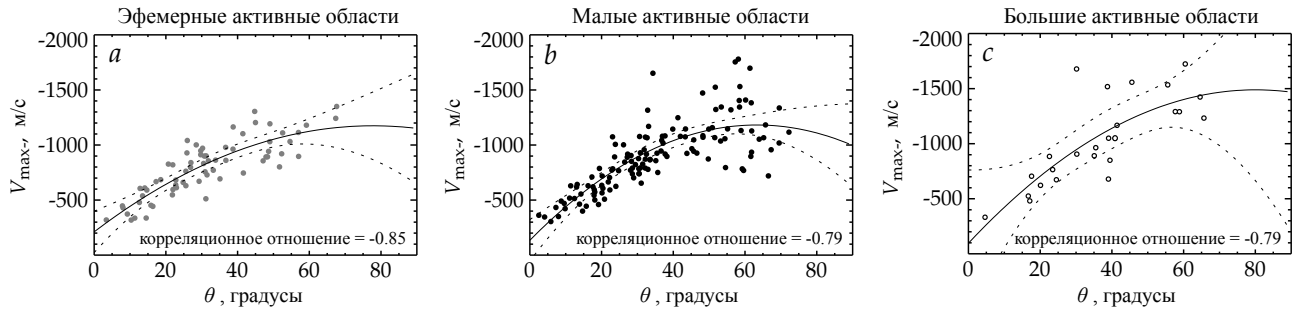


Рисунок 1. Зависимости наибольшей отрицательной доплеровской скорости $V_{\max-}$ от гелиоцентрического угла θ на начальной стадии развития активных областей: a — эфемерных; b — малых; c — больших. Сплошные линии соответствуют линиям регрессии; штриховые линии — уровню значимости 99 % для среднего значения. Серым, черным и белым цветом отмечены эфемерные, малые и большие активные области соответственно

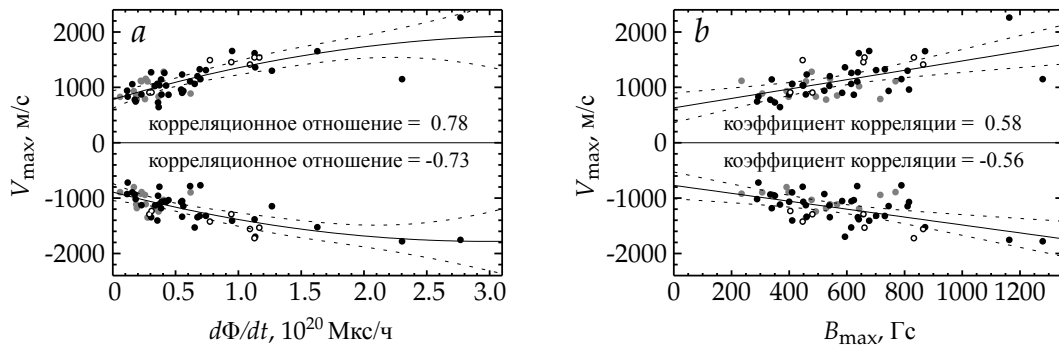


Рисунок 2. Зависимости наибольших положительной и отрицательной доплеровских скоростей V_{\max} : a — от скорости роста магнитного потока $d\Phi/dt$; b — от максимальной плотности магнитного потока B_{\max} в активных областях, образующихся вблизи лимба. Обозначения такие же, как на Рисунке 1

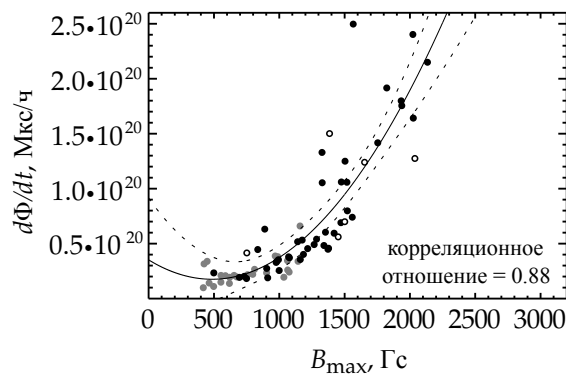


Рисунок 3. Зависимость скорости роста магнитного потока $d\Phi/dt$ от максимальной плотности магнитного потока B_{\max} . Обозначения такие же, как на Рисунке 1

Получена квадратичная зависимость с низкой дисперсией и высоким корреляционным отношением между скоростью роста и плотностью выходящих магнитных потоков активных областей (Рисунок 3). Считается, что в конвективной зоне магнитный поток поднимается к поверхности в основном под действием силы магнитной плавучести F_b , которая пропорциональна квадрату плотности магнитного потока B^2 (Parker, 1955 и другие). Увеличение плотности магнитного потока приводит к росту силы магнитной плавучести. Как следствие, магнитный поток всплывает быстрее и выходит на поверхность с большей скоростью роста $d\Phi/dt$. Таким образом, полученная по данным наблюдений зависимость на Рисунке 3, где скорость роста магнитного потока $d\Phi/dt$ пропорциональна квадрату плотности магнитного потока B^2 , согласуется с тем, что магнитная плавучесть играет основную роль в выходе магнитных потоков активных областей на солнечную поверхность.

Раздел 3.2 посвящен исследованию горизонтальных течений фотосферной плазмы по доплеровским измерениям скоростей в четырех активных областях NOAA 9037, NOAA 8536, NOAA 8635 и NOAA 9064, формирующихся вблизи солнечного лимба. Активные области располагаются в разных секторах солнечного диска примерно на одинаковом гелиоцентрическом расстоянии. Они характеризуются высокой скоростью роста магнитного потока, а также большими величинами полных магнитных потоков.

В первые часы развития активных областей в горизонтальном поле скоростей обнаружены обширные участки высоких доплеровских скоростей разного знака (Рисунок 4). Скоростные структуры возникают в начале выхода магнитного потока и устойчиво существуют до 15 ч. Значения доплеровских скоростей существенно превосходят скорости конвективных течений спокойного Солнца. Они возрастают постепенно и достигают наибольших значений 1410–1700 м/с примерно в середине периода существования скоростных структур. Изначально участки доплеровских скоростей разного знака примыкают друг к другу, но затем расходятся вместе с противоположными полярностями. Возникающие течения плазмы располагаются внутри выходящих магнитных потоков и почти не захватывают окружающие области спокойного Солнца.

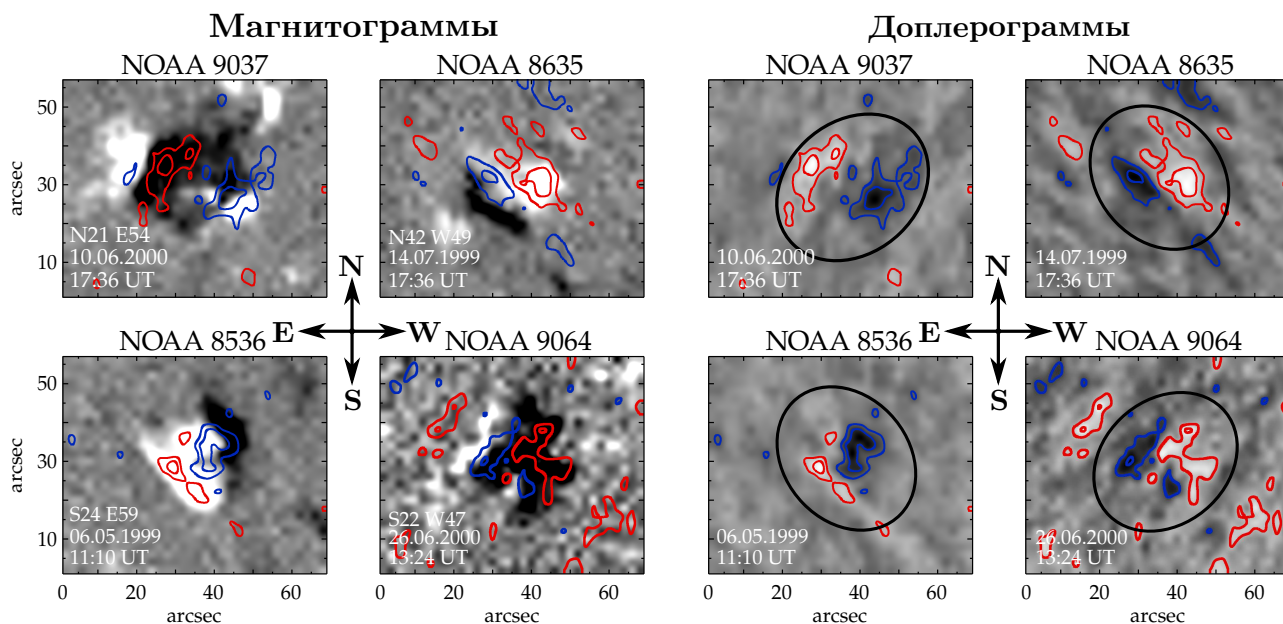


Рисунок 4. Активные области NOAA 9037, NOAA 8635, NOAA 8536, NOAA 9064, возникающие вблизи лимба в разных секторах солнечного диска. На фотосферные магнитограммы и доплерограммы наложены изолинии доплеровской скорости ± 500 , 1000 м/с (синяя изолиния — отрицательная скорость, красная — положительная)

Наше исследование активных областей, возникающих вблизи лимба (в диссертации Раздел 3.1.3), показало, что мощные горизонтальные расходящиеся течения плазмы на начальной стадии выхода магнитных полей образуются не всегда. Они возникают только при появлении активных областей с высокими плотностью и скоростью роста магнитного потока.

В теоретической модели Cheung *et al.* (2010) дана физическая интерпретация обнаруженных горизонтальных расходящихся течений фотосферной плазмы на начальной стадии образования активных областей. Всплывающая магнитная трубка создает в фотосфере избыток газового давления. Возникающий при этом горизонтальный градиент газового давления приводит к появлению горизонтальных расходящихся течений плазмы. Модель Toriumi, Yokoуama (2013) подтвердила, что горизонтальные расходящиеся течения плазмы вызваны горизонтальным градиентом газового давления, возникающим из-за увеличения плотности плазмы в вершине выходящей магнитной петли. В фотосфере сжатая плазма выталкивается горизонтально, поэтому расхождение скоростных структур разных знаков связано с оттоком плазмы от выходящего магнитного потока. Анализ других возможных течений показал, что скорости горизонтальных расходящихся течений плазмы также могут

содержать вклад скоростей горизонтального перемещения оснований магнитных петель и стекания плазмы, выносимой в атмосферу Солнца выходящим магнитным потоком.

Раздел 3.3 содержит результаты исследования усиленного подъема фотосферной плазмы на начальной стадии образования одной большой (NOAA 10488) и двух малых (NOAA 9021, NOAA 10768) активных областей. Рассматриваемые активные области являются приэкваториальными и находятся примерно на одинаковом гелиоцентрическом расстоянии от центра солнечного диска, что позволяет выполнять их сравнение, не учитывая эффект проекции.

На начальной стадии развития всех трех активных областей обнаружены сильные восходящие течения плазмы, которые появляются до выхода магнитного потока на солнечную поверхность. Возникающие скоростные структуры имеют площадь до 5×10^7 км² (или 8 Мм в диаметре) и существуют 1–2 ч. Максимальные значения отрицательных доплеровских скоростей в них возрастают до -1700 м/с. Такие течения плазмы отличаются от конвективных течений в гранулах и супергранулах спокойного Солнца по размеру, значениям скоростей и времени существования.

Магнитные потоки рассматриваемых активных областей имеют разные характеристики. Однако скоростные структуры, возникающие на начальной стадии их развития, не показывают существенных различий. Схожие параметры усиленных восходящих течений на ранней фазе формирования большой и малых активных областей могут указывать на выход элементарных магнитных потоков (из которых состоят магнитные потоки активных областей) со схожими первоначальными физическими свойствами.

Мы использовали результаты идеализированной МГД-модели выхода магнитного потока из подфотосферных слоев в атмосферу Солнца Toriumi *et al.* (2011) для исследования причин усиленных восходящих течений фотосферной плазмы на начальной стадии формирования активных областей. Основные параметры модели представлены в Таблице 1. Магнитный поток трубки $\Phi = 2.1 \times 10^{19}$ Мкс сопоставим с магнитным потоком элементарных петель, которые выходят в развивающихся

Таблица 1. Основные параметры модели Toriumi *et al.* (2011)

Нормализация физических значений:	
Фотосферный масштаб высоты давления	$H_0=170$ км
Скорость звука	$C_{s0} = 6.8$ км/с
Время прохождения звука	$\tau_0 = H_0/C_{s0}=25$ с
Напряженность магнитного поля	$B_0=250$ Гс
Домен:	
$(-120, -120, -20) \leq (x/H_0, y/H_0, z/H_0) \leq (120, 120, 150)$ или $40.8 \text{ ММ} \times 40.8 \text{ ММ} \times 28.9 \text{ ММ}$	
Стратификация:	
Адиабатически стратифицированная конвективная зона	$z/H_0 < 0$
Низкотемпературная изотермическая фотосфера/хромосфера	$0 \leq z/H_0 < 10$
Переходный слой с высоким градиентом температуры	$10 < z/H_0 < 20$
Высокотемпературная изотермическая корона	$z/H_0 \geq 20$
Магнитная трубка:	
Радиус	$R_{\text{tube}}=2.5H_0=425$ км
Напряженность осевого магнитного поля	$B_{\text{tube}}=15B_0=3750$ Гс
Закрученность	$q=0.2/H_0=1.1 \times 10^{-3} \text{ км}^{-1}$
Магнитный поток	$\Phi=2.1 \times 10^{19} \text{ Мкс}$

активных областях. Таким образом, мы сравниваем результаты моделирования с характеристиками элементарных магнитных потоков в рассматриваемых активных областях, но не с самими активными областями.

Исследована динамика магнитного поля и восходящих течений плазмы на поверхности Солнца. Обнаружено, что полученное в модели временное изменение скорости и площади подъема плазмы достаточно хорошо согласуется с результатами наблюдений (Рисунок 5). И данные наблюдений, и результаты моделирования показывают следующее: 1) усиленные восходящие течения предшествуют появлению магнитного потока; 2) скорость восходящих течений достигает наибольшего значения вскоре после появления магнитного потока на поверхности; 3) площадь усиленных восходящих течений становится максимальной после начала выхода магнитного потока и достижения наибольшей скорости подъема плазмы.

Согласие результатов моделирования с наблюдениями позволяет предположить общую физическую основу усиленных восходящих течений плазмы. Анализ сил, действующих на плазму, показал две разные

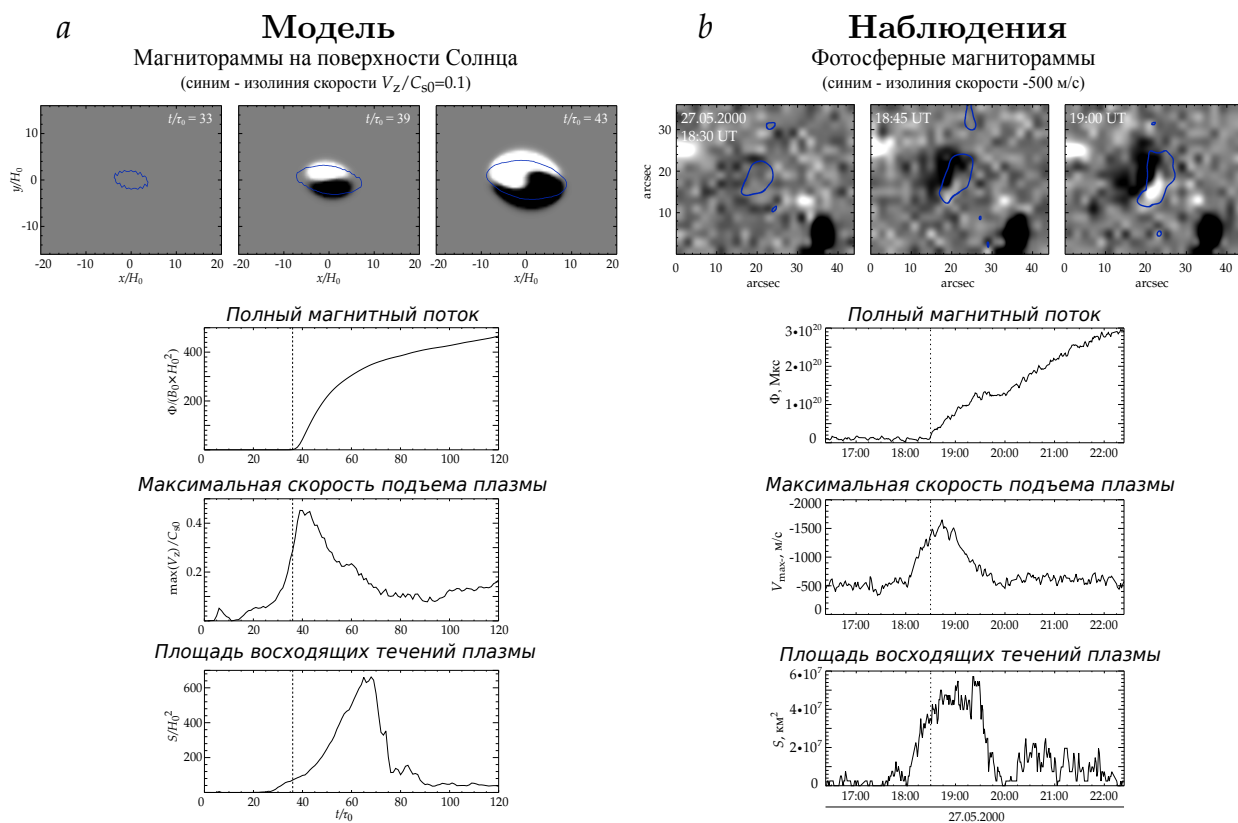


Рисунок 5. Панель *a* — результаты, полученные с помощью идеализированной МГД-модели Toriumi *et al.*, 2011 выхода магнитного потока и сопутствующего подъема плазмы на солнечной поверхности; панель *b* — наблюдения усиленного подъема плазмы на начальной стадии выхода магнитного потока малой активной области NOAA 9021 в фотосфере Солнца. На изображениях темный цвет соответствует отрицательным магнитным полям, светлый цвет — положительным. На графиках временного изменения параметров на поверхности Солнца вертикальной штриховой линией отмечено начало выхода магнитного потока

движущие силы восходящих течений плазмы, которые зависят от стадии развития выходящего магнитного потока. Увеличение скорости подъема плазмы на поверхности Солнца перед выходом магнитного потока происходит за счет увеличения градиента газового давления ($t/\tau_0=33$). Когда магнитный поток проникает в фотосферу Солнца, скорость подъема плазмы продолжает возрастать за счет увеличения градиента магнитного давления ($t/\tau_0=39$). После уменьшения градиента магнитного давления вследствие расширения выходящего магнитного потока в атмосферу Солнца скорость восходящих течений на поверхности уменьшается ($t/\tau_0=50$).

Таким образом, сравнение наблюдательных данных с идеализированной МГД-моделью показало их хорошее согласие и позволило установить, что движущей силой восходящих течений плазмы

до появления магнитного потока в фотосфере является градиент газового давления, в то время как после выхода магнитного потока начинает действовать градиент магнитного давления.

В **Заключении** сформулированы основные выводы диссертационной работы.

1. Получена центрোলимбовая зависимость наибольших значений отрицательных доплеровских скоростей, которая показывает, что на начальном этапе образования активных областей горизонтальные скорости растекания плазмы превосходят вертикальные скорости подъема.
2. Найдена квадратичная связь с низкой дисперсией и высоким корреляционным отношением между скоростью роста и плотностью магнитного потока на начальной стадии появления активных областей. Полученная зависимость объясняется действием силы магнитной плавучести, которая пропорциональна квадрату плотности магнитного потока.
3. Исследованы горизонтальные течения фотосферной плазмы в активных областях, возникающих на краю солнечного диска. Обнаружено, что в начале выхода магнитного потока формируются и присутствуют в течение нескольких часов обширные области высоких доплеровских скоростей разного знака, локализующиеся в противоположных полярностях. Наибольшие значения горизонтальных доплеровских скоростей связаны квадратично со скоростью роста и линейно с плотностью выходящих магнитных потоков. Вероятно, сильные горизонтальные расходящиеся течения фотосферной плазмы на начальном этапе выхода магнитного потока активных областей вызваны горизонтальным градиентом газового давления, возникающим в вершине выходящей магнитной петли. Кроме того, наблюдаемые течения могут содержать вклад скоростей горизонтального перемещения оснований магнитных петель и стекания плазмы, выносимой в атмосферу Солнца выходящим магнитным потоком.

4. Обнаружен мощный подъем плазмы в начале появления большой и малых активных областей в фотосфере Солнца. Схожие параметры усиленных восходящих течений при появлении активных областей разных пространственных масштабов могут быть связаны с выходом элементарных магнитных потоков со схожими первоначальными физическими свойствами. Сопоставление наблюдательных данных с результатами идеализированной МГД-модели показало хорошее согласие и позволило установить, что непосредственно перед тем, как магнитный поток достигает фотосферы, усиленные восходящие течения вызваны градиентом газового давления, в то время как после появления магнитного потока в фотосфере ключевую роль играет градиент магнитного давления.

Публикации по теме диссертации

По теме диссертации опубликовано 5 статей в российских и международных рецензируемых журналах.

1. Григорьев В. М., Ермакова Л. В., Хлыстова А. И. Динамика лучевых скоростей и магнитного поля в фотосфере Солнца при возникновении мощной активной области NOAA 10488 // Письма в *Астрономический журнал*. – 2007. – Том 33, № 11. – С. 858–862.

2. Khlystova A. Center-limb dependence of photospheric velocities in regions of emerging magnetic fields on the Sun // *Astronomy & Astrophysics*. – 2011. – Vol. 528. – P. A7.

3. Khlystova A. The horizontal component of photospheric plasma flows during the emergence of active regions on the Sun // *Solar Physics*. – 2013. – Vol. 284 – P. 343–361.

4. Khlystova A. The relationship between plasma flow Doppler velocities and magnetic field parameters during the emergence of active regions at the solar photospheric level // *Solar Physics*. – 2013. – Vol. 284. – P. 329–341.

5. Khlystova A., Toriumi S. Photospheric plasma flows during the emergence of small active regions on the Sun // *The Astrophysical Journal*. – 2017. – Vol. 839, issue 1. – P. 63.

Список цитируемой литературы

- Cheung M. C. M., Rempel M., Title A. M., Schüssler M.* Simulation of the formation of a solar active region // *ApJ*. — 2010. — Vol. 720. — P. 233–244.
- Parker E. N.* The Formation of Sunspots from the Solar Toroidal Field // *ApJ*. — 1955. — Vol. 121. — P. 491–507.
- Toriumi S., Miyagoshi T., Yokoyama T., Isobe H., Shibata K.* Dependence of the magnetic energy of solar active regions on the twist intensity of the initial flux tubes // *PASJ*. — 2011. — Vol. 63. — P. 407–415.
- Toriumi S., Yokoyama T.* Three-dimensional magnetohydrodynamic simulation of the solar magnetic flux emergence. Parametric study on the horizontal divergent flow // *A&A*. — 2013. — Vol. 553. — A55.

Отпечатано в издательском отделе ИСЗФ СО РАН
Заказ № 187 от «___» _____ 2019 г.
Объем 21 с. Тираж 150 экз.