

**ОТЗЫВ**  
**официального оппонента на диссертацию Анны Иннокентьевны Хлыстовой**  
**«ТЕЧЕНИЯ ПЛАЗМЫ ПРИ ПОЯВЛЕНИИ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ В**  
**ФОТОСФЕРЕ СОЛНЦА»,**  
**представленную на соискание ученой степени**  
**кандидата физико-математических наук**  
**по специальности 01.03.03 - физика Солнца**

Диссертация А.И. Хлыстовой представляет собой актуальное, интересное и важное экспериментально-теоретическое исследование течений плазмы, связанных со всплытием магнитных потоков из конвективной зоны и наблюдаемых в фотосфере Солнца при появлении и начальном развитии активных областей различных пространственных масштабов. Работа выполнена под руководством чл.-корр. РАН В.М. Григорьева в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук (ФГБУН ИСЗФ СО РАН).

Актуальность работы определяется следующими факторами. Во-первых, всплывающие магнитные трубки, заполненные подфотосферной плазмой, несут важную информацию о физических характеристиках конвективной зоны, недоступной прямым наблюдениям. Эта информация необходима для уточнения строения Солнца и проверки моделей солнечного магнитного динамо. Во-вторых, многие детали формирования активных областей не до конца еще ясны, несмотря на многолетние исследования. Новые сведения позволяют построить более точные количественные модели этих комплексных физических процессов. В-третьих, активные области являются источниками экстремальных событий космической погоды - солнечных вспышек, корональных выбросов массы, межпланетных ударных волн, повышенных потоков энергичных частиц и жесткого электромагнитного излучения. Эти явления влияют на межпланетное и околоземное космическое пространство, на атмосферу нашей планеты. Изучение магнитных полей на ранних этапах их формирования и связанных с этим течений плазмы в фотосфере важно для понимания эволюции активных областей и разработки методов прогнозирования космической погоды.

В основе диссертации лежит многолетняя систематическая работа А.И. Хлыстовой в области исследования магнитных полей и течений плазмы в фотосфере Солнца по наблюдениям инструмента MDI на борту космического аппарата SOHO за период времени с 1999 по 2008 г., т.е. почти за весь 23-й цикл солнечной активности. На основе данных этого эксперимента было получено множество важных результатов по солнечному магнетизму и солнечной активности. Несмотря на наличие более современных инструментов (в частности, HMI/SDO), можно отметить, что данные MDI/SOHO еще не до конца себя исчерпали и из них можно извлекать важную новую физическую информацию. Это наглядно продемонстрировано в диссертации. Данные MDI проверены и перепроверены множеством международных коллективов экспертов. В работе использованы только известные и надежные методы обработки данных, такие как регрессионный анализ. Учтены известные артефакты MDI. Этим определяется достоверность полученных в работе результатов.

Диссертация состоит из введения, 3-х глав, заключения, списка сокращений, списка цитируемой литературы, содержащего 223 наименования, приложения, представляющего собой таблицу с основными характеристиками 224 исследованных активных областей. Объем диссертации 140 страниц, включая 31 рисунок и 14 таблиц.

**Во Введении** дано краткое, но убедительное обоснование актуальности выбранной темы диссертационной работы, сформулирована ее цель и поставлены задачи, которые необходимо решить для достижения цели, отмечены научная новизна, научная и практическая значимость работы, кратко описана методология исследования,

сформулированы положения, выносимые на защиту, обоснована достоверность результатов, перечислены способы апробации работы, публикации по теме диссертации, обозначены личный вклад автора, структура и объем диссертации.

**Глава 1** содержит достаточно обстоятельный и сбалансированный обзор исследований по тематике диссертации, связанной с появлением и начальным развитием активных областей на Солнце. Обзор содержит как сведения, полученные из эксперимента, так и из теоретического моделирования посредством решения уравнений магнитной гидродинамики (МГД). Приведены основные закономерности появления магнитных потоков на фотосфере, описана феноменология развития активных областей и физические механизмы их формирования, включая образование и подъем магнитных трубок. Дано описание известных видов течений плазмы, возникающих при всплытии магнитных потоков, при их выходе на поверхность Солнца и при начальном развитии активных областей. Рассматривается не только фотосфера, но также хромосфера, переходная область и корона. Это важно, поскольку процессы формирования активных областей затрагивают все слои солнечной атмосферы. Отмечено, что горизонтальные течения плазмы на начальной стадии формирования активных областей ранее исследовались только по движению различных трассеров на диске Солнца, но не по измерению скоростей на основе эффекта Доплера. В данной работе это сделано впервые.

**Глава 2** посвящена описанию методологии, инструментов и объектов исследования. Как уже было отмечено выше, диссертационная работа построена на анализе и интерпретации наблюдательных данных космического эксперимента MDI/SOHO. В этом эксперименте накоплен большой массив данных (с 1996 г. по 2011 г.) по измерению яркости Солнца в оптическом континууме, продольных лучу зрения компонент магнитного поля и скорости в фотосфере. В главе представлено краткое описание этого инструмента, принципов измерения яркости оптического континуума, скоростей и магнитных полей в фотосфере. Помимо этого, подробно изложена методика обработки данных и вычисления анализируемых физических параметров. Здесь стоит отметить, что методика и основные компьютерные программы для обработки данных собственноручно разработаны автором диссертации. При этом целесообразно использованы библиотеки программ, популярные в международном сообществе астрономов и солнечных физиков (IDL, Astronomy User's Library, SolarSoft, ISTEP).

Работа с данными космического эксперимента, помимо понимания основных принципов его работы, также требует детального знания режимов и особенностей его работы, имеющихся приборных эффектов (артефактов) и способов их устранения. Автор диссертации продемонстрировал хорошее понимание работы инструмента и особенностей полученных с его помощью наблюдательных данных. В частности, в параграфе 2.2 приведено подробное обсуждение способов избавления от вклада различных эффектов в измеряемый сигнал доплеровской скорости и выделения физически значимых скоростей течений плазмы в фотосфере. Особое внимание уделено пространственному совмещению различных типов данных MDI, что принципиально важно для совместного определения различных физических величин, наблюдаемых на поверхности Солнца.

В конце главы приведены критерии отбора активных областей для последующего анализа.

**Глава 3** является наиболее важной, поскольку в ней представлены все физически значимые результаты работы, выносимые на защиту, и подробное описание их получения. Данная глава состоит из трех разделов.

В **разделе 3.1** представлено статистическое исследование закономерностей течений плазмы и параметров магнитного поля на начальной стадии развития 224 активных областей. Данная выборка внушительна и полученные результаты статистически значимы. Построены центролимбовые зависимости наибольших отрицательных (к наблюдателю) скоростей плазмы от гелиоцентрического угла активных областей. На основе анализа построенных зависимостей установлено, что горизонтальные скорости растекания плазмы

вдоль поверхности Солнца превышают вертикальные скорости подъема плазмы в 2-3 раза на начальной стадии развития активных областей. Это характерно для всех типов рассмотренных областей (больших, малых и эфемерных), что указывает на общность свойств развития областей разного пространственного масштаба. Благодаря большой выборке, установлен квадратичный вид зависимости с низкой дисперсией и высоким корреляционным отношением между скоростью изменения и плотностью выходящего магнитного потока. Это важный и красивый результат, наглядно подтверждающий ведущую роль магнитной плавучести в выходе магнитных трубок, формирующих активные области.

**Раздел 3.2** посвящен детальному исследованию связи течений плазмы и магнитных полей на примере анализа четырех возникающих активных областей вдали от центра солнечного диска – на гелиографических углах (50-60 градусов), на которых, как показано в разделе 3.1, горизонтальные течения плазмы превышают вертикальные на раннем этапе всплытия магнитных трубок. В результате анализа данных обнаружено появление участков разнонаправленных горизонтальных течений плазмы, соответствующих противоположным магнитным полярностям. Эти участки существуют на протяжении нескольких первых часов выхода магнитных потоков из-под фотосферы. На основе сопоставления полученных наблюдательных фактов с опубликованными другими авторами результатами МГД-моделирования сделан вывод о том, что горизонтальные течения в основном обусловлены горизонтальным градиентом давления плазмы в вершине выходящих искривленных магнитных трубок (петель). Также обсуждается, что помимо этого вклад в горизонтальные течения может быть сделан горизонтальными перемещениями подножий петель и оттоком плазмы из вершин петель под действием силы тяжести.

В **разделе 3.3** исследуется обнаруженный эффект усиленного подъема плазмы в фотосфере непосредственно (за 10-30 мин) до появления в ней всплывающих магнитных потоков и в первые часы после их появления. Исследование выполнено на примере детального анализа трех формирующихся активных областей (одной большой и двух малых) и сопоставления наблюдений с результатами численного МГД-моделирования японских коллег автора диссертации. Наблюдательные и модельные результаты хорошо согласуются друг с другом. Это позволило сделать вывод, что перед самым выходом магнитных трубок на поверхность Солнца усиленные восходящие потоки плазмы вызваны градиентом газового давления, вызванного всплывающим магнитным потоком, тогда как в более поздние моменты времени основную роль играет градиент магнитного давления. Через 1-2 ч после этого потоки плазмы ослабевают, по всей видимости, вследствие расширения магнитного потока в хромосферу и корону.

**В заключении** сформулированы основные результаты диссертации.

Диссертация хорошо оформлена, написана простым, ясным языком, ошибок и опечаток практически не содержит. Диссертация четко структурирована, ее удобно читать. Все рисунки и таблицы понятны. Отдельно хочется отметить, что автор облегчил жизнь читателю электронной версии диссертации, снабдив ее гиперссылками на цитируемую литературу, рисунки и таблицы.

Все положения, выносимые на защиту, получены в ходе оригинального исследования автора. Они строго обоснованы, являются новыми и имеют существенную научную значимость. Результаты будут использоваться в ГАИШ МГУ, ИЗМИРАН, ИКИ РАН, ФИАН, ГАО РАН, ИСЗФ СО РАН, САО РАН и других научных учреждениях, где ведутся работы по физике Солнца.

Результаты диссертации опубликованы в 5 статьях в ведущих астрономических рецензируемых изданиях (Письма в Астрон. Ж., Astron. & Astrophys., Solar Phys., Astrophys. J.) из списка ВАК, неоднократно докладывались на российских и международных тематических конференциях и семинарах.

*По существу работы имеются следующие небольшие замечания:*

