

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Ордена Трудового Красного Знамени Институт солнечно-земной физики
Сибирского отделения Российской академии наук

На правах рукописи



УДК 523.98

Кауфман Анастасия Сергеевна

**Диагностика атмосферы солнечных пятен по
наблюдениям трехминутных колебаний**

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 Института солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук.

Научный руководитель:

Анфиногентов Сергей Александрович, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ордена Трудового Красного Знамени Института солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, старший научный сотрудник.

Официальные оппоненты:

Цап Юрий Теодорович, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Крымская астрофизическая обсерватория РАН», заведующий лабораторией отдела Радиоастрономии и геодинамики.

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 Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук

Защита состоится «_____» _____ 2020 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д.003.034.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Ордена Трудового Красного Знамени Института солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, расположенном по адресу: 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 126А, ИСЗФ СО РАН

С диссертацией можно ознакомиться на сайте <http://iszf.irk.ru> и в библиотеке ИСЗФ СО РАН.

Автореферат разослан «_____» _____ 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д.003.034.01,
к.ф.-м.н.

Поляков В.И.

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования.

Актуальность работы обусловлена необходимостью развития методов диагностики плазмы и получению новых сведений о строении атмосферы над солнечным пятном. Для атмосферы солнечного пятна характерны расходящиеся линии магнитного поля, вдоль которых распространяются медленные магнитозвуковые волны, проходя через температурный минимум, хромосферу и достигая корональных высот. Магнитогидродинамические (МГД) волны повсеместно наблюдаются в короне Солнца и, являются одним из основных кандидатов на роль агента, осуществляющего перенос энергии из нижних слоев атмосферы Солнца и ее рассеяние в короне в виде тепла. Нужно отметить, что проблема нагрева солнечной короны стоит перед научным сообществом уже более 75 лет [1] и все еще остается нерешенной, несмотря на существенное развитие как наблюдательных инструментов, так и средств численного и аналитического моделирования. В этом контексте исследование волновых процессов в атмосфере Солнца, как агентов переноса энергии, становится особенно актуальным

С другой стороны МГД волны могут быть использованы для получения диагностической информации о плазме в солнечной атмосфере, в том числе в короне. Именно в короне происходят явления, определяющие космическую погоду и состояние околоземного пространства, такие как солнечные вспышки и корональные выбросы масс (КВМ). Важно, что вспышки и КВМ происходят, как правило в развитых активных областях, которые в своем составе имеют одно или несколько солнечных пятен. Поэтому, изучение свойств плазмы над солнечными пятнами, а так же структуры атмосферы солнечного пятна является важной и актуальной составляющей современной физики Солнца.

Анализ наблюдений солнечных пятен в различных спектральных линиях позволяет строить модели атмосферы солнечного пятна, описывающие высотное распределение параметров плазмы, таких как температура, давление и концентрация. На данный момент существует несколько моделей атмосферы над тенью солнечного пятна [2–4]. Пожалуй, наиболее популярной моделью атмосферы солнечного пятна является модель Малтби [2]. Несмотря на то, что эта модель была создана в восьмидесятих годах прошлого века, она до сих пор используется во многих исследованиях. Другая востребованная модель — это полуэмпирическая модель атмосферы тени пятна, разработанная Фонтенлой и др. [3], и использующая новые спектральные наблюдения и методы моделирования, ставшие доступными в XXI веке. Качественное отличие между этими двумя моделями заключается в протяженности хромосферы над тенью пятна. В модели Малтби [2], как и в модели Лайтса [4], атмосфера над

тенью пятна имеет хромосферу толщиной около 1000 км, в то время, как модель Фонтенлы [3] характеризуется наличием протяженного температурного минимума, простирающегося вплоть до высоты около 1000 км, где температура резко увеличивается с 3500 К до корональных значений. То есть в модели Фонтенлы хромосфера, как протяженный слой с температурой $\sim 10^4$ К просто отсутствует. Таким образом, в настоящее время в научном сообществе отсутствует единое мнение о том, какая модель атмосферы тени пятна лучше соответствует реальности, а конкурирующие модели не только отличаются друг от друга отдельными деталями, но и имеют качественные отличия в строении атмосферы. В таких обстоятельствах выбор той или иной модели может в корне поменять результаты интерпретации наблюдений. Для того, чтобы решить эту проблему необходимо привлечение дополнительной информации о строении атмосферы тени солнечных пятен из независимых источников. Такими источниками могут стать как наблюдения в микроволновом диапазоне, так и применение методов магнитогидродинамической (МГД) сейсмологии к интерпретации наблюдений постоянно присутствующих в пятнах трёхминутным колебаниям.

МГД сейсмология является актуальным направлением в физике Солнца и позволяет получить информацию об активных областях, которую невозможно или очень трудно получить другими методами (магнитное поле в короне, трехмерное распределение температуры и т.д.). Термин *сейсмологический*, встречающийся в тексте диссертации и автореферата, следует понимать, как имеющий отношение к МГД сейсмологии солнечной атмосферы по наблюдениям трёхминутных колебаний.

Новые возможности практического применения МГД сейсмологии появились после запуска космического аппарата «Обсерватория Солнечной Динамики» (SDO). Инструмент Atmospheric Imaging Assembly (AIA), установленный на SDO, позволяет наблюдать магнитозвуковые колебания и волны в виде изменения интенсивности излучения на изображениях, полученных на разных длинах волн ультрафиолетового (УФ) и крайнего ультрафиолетового (КУФ) диапазонов, соответствующим разным высотам и температурам солнечной атмосферы. Доступность данных SDO/AIA привела к появлению новых методов детектирования и измерения параметров волн и колебаний, а также их использованию для диагностики корональной плазмы. Широкое применение и развитие методов МГД сейсмологии и использование наблюдений SDO/AIA, которые обладают на сегодняшний день наилучшим пространственным и временным разрешениями, также обеспечивает актуальность настоящей диссертационной работы.

Целью настоящей диссертационной работы является изучение атмосферы над солнечными пятнами по данным наблюдений трёхминутных колебаний на УФ и КУФ изобра-

жениях.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Разработан *метод задержек* для измерения эффективных высот формирования КУФ излучения на длинах волн 171 Å, 193 Å, 304 Å, 1600 Å и 1700 Å по многоволновым наблюдениям трёхминутных колебаний на основе задержек, наблюдающихся между разными каналами.
2. Разработан *метод задержек и смещений* для определения скорости звука в солнечной атмосфере над пятнами и высот формирования излучения на различных длинах волн по данным многоуровневых наблюдений трёхминутных колебаний на основе задержек и смещений, связанных с распространением волн между различными уровнями.
3. Разработан основанный на МГД сейсмологии метод диагностики поперечного распределения температуры в корональных структурах, связанных с солнечными пятнами, по наблюдениям распространяющихся медленных МГД-волн.

Научная новизна.

1. Впервые проведено сейсмологическое измерение расстояния между слоями солнечной атмосферы тени солнечного пятна, излучающими на пяти различных длинах волн УФ и КУФ диапазонов: 171 Å, 193 Å, 304 Å, 1600 Å и 1700 Å.
2. Разработан новый алгоритм (метод сдвигов и задержек) для измерения скорости звука, температуры и расстояния между слоями атмосферы тени пятна, излучающими в спектральных линиях УФ диапазона. Метод основан на анализе многоуровневых наблюдений колебаний интенсивности излучения с двухмерным пространственным разрешением и использует фотосферные магнитограммы для измерения наклона силовых линий магнитного поля. Метод не привлекает никаких предположений о высотах формирования излучения или скорости распространения волн в соответствующих слоях атмосферы.
3. Впервые проведена сейсмологическая оценка расстояния между температурным минимумом (1600 Å) и переходной зоной (304 Å) над тенями солнечных пятен в ряде активных областей, а также измерена усредненная скорость звука и температура между указанными слоями с учетом дисперсионных свойств медленных магнитоакустикогра-витационных волн.

4. Разработан оригинальный алгоритм для определения поперечного распределения температуры в корональных структурах над солнечным пятном по наблюдениям медленных МГД колебаний. Новизна используемого подхода заключается в применение метода прямого моделирования КУФ излучения на основе результатов численного решения полной системы МГД уравнений.
5. Впервые выполнена сейсмологическая диагностика поперечного распределения температуры в веерообразных корональных структурах. На примере двух активных областей продемонстрировано, что для веерообразных корональных структур, связанных с солнечными пятнами, характерны горячая внутренняя часть и холодная периферия.

Научная и практическая значимость.

Методы сейсмологической диагностики солнечной атмосферы, разработанные в рамках данной диссертационной работы, показали свою эффективность в определении параметров солнечной атмосферы над тенью пятен. Измеренные расстояния между излучающими слоями на пяти различных длинах волн: 171 Å, 193 Å, 304 Å, 1600 Å и 1700 Å могут быть использованы для сопоставления с измерениями, получаемыми другими методами, для получения наиболее полной информации о высотной структуре атмосферы солнечных пятен.

Метод сдвигов и задержек, разработанный в данной работе, позволяет получать информацию о высотной структуре солнечной атмосферы, основываясь только на наблюдениях МГД волн и, не требует привлечения модельной информации о высотах формирования излучения или скорости звука в соответствующих слоях атмосферы. Это позволяет использовать его, как независимый источник информации наряду с, например, микроволновыми наблюдениями для верификации моделей атмосферы тени солнечного пятна.

Измерения высот формирования КУФ излучения, фазовой скорости медленных магнитоакустических волн, скорость звука и соответствующей ей температуры плазмы существенно дополнили знания о волновых процессах и параметрах плазмы в активных областях на Солнце.

Метод для определения поперечного распределения температуры в корональных структурах над активными областями может быть использован как альтернативно, так и совместно с методами диагностики тепловой структуры корональных образований, основанных на дифференциальной мере эмиссии.

Полученные результаты в ходе работы внесли существенный вклад в развитие корональной МГД-сейсмологии. Все представленные в работе методы могут быть использованы

в дальнейшем для интерпретации многоуровневых наблюдений продольных МГД волн в атмосфере Солнца.

Положения, выносимые на защиту:

1. Впервые полученные результаты измерений эффективных высот формирования излучения на пяти длинах волн УФ и КУФ диапазонов: 171 Å, 193 Å, 304 Å, 1600 Å и 1700 Å, выполненные методом МГД сейсмологии для ряда активных областей. Проведенные оценки основаны на измерении задержек распространения медленных магнитозвуковых волн между соответствующими излучающими слоями в предположении, что данные волны распространяются со скоростью близкой к звуковой.
2. Новый метод смещений и задержек, предназначенный для диагностики температуры и высотной структуры атмосферы солнечных пятен по анализу наблюдений трёхминутных колебаний на двух уровнях солнечной атмосферы. Расстояние между излучающими слоями определяется за счет измерения пространственного смещения медленной МГД волны, возникающего во время ее распространения вверх вдоль расходящихся силовых линий магнитного поля. Метод не требует привлечения модельной информации о скорости распространения волн или о высотах формирования излучения.
3. Сейсмологическая диагностика высотной структуры атмосферы тени солнечного пятна, выполненная методом смещений и задержек. Для ряда активных областей измерено расстояние между температурным минимумом (1600 Å) и переходной зоной (304 Å). Также впервые выполнена оценка скорости звука и температуры между указанными слоями с учетом дисперсии и без привлечения модельной информации об их высотах или скорости распространения волн. Результаты измерений согласуются с новейшей моделью Фонтенлы и др. для атмосферы тени пятна.

Достоверность результатов. Полученные в ходе работы результаты согласуются с результатами, полученными другими методами, соответствуют теоретическим предположениям и выводам других исследований.

Апробация результатов. Основные результаты диссертации докладывались на следующих конференциях:

1. RADIOSUN-2, Люблин, Польша, 2014, устный доклад “The measurement of the emission forming heights for different wavelengths of the ultraviolet spectral range in sunspot umbrae atmosphere”

2. RADIOSUN-4, Иркутск, 2015, устный доклад “The estimation of the sound speed and the emission formation heights above sunspots from the multilevel observations of three minutes oscillations”
3. BUKS-2018, Ла-Лагуна, Тенерифе, Испания, устный доклад “Seismological diagnostic of transverse temperature distribution in coronal structures associated with sunspots”
4. Солнечно и солнечно-земная физика 2014, ГАО РАН, Санкт-Петербург, устный доклад «Использование наблюдений 3-минутных колебаний для измерения скорости звука и высот формирования излучения в атмосфере солнечных пятен»
5. Солнечно и солнечно-земная физика 2015, ГАО РАН, Санкт-Петербург, устный доклад «Сейсмологический метод измерения средней скорости звука и высотных расстояний в атмосфере солнечных пятен»
6. Физика плазмы в солнечной системе - 2015, ИКИ РАН, Москва, 2015, стендовый доклад «Исследование высотной стратификации атмосферы тени солнечного пятна по наблюдениям 3-минутных колебаний»
7. БШФФ-2013, ИСЗФ СО РАН, 2013, Иркутск, стендовый доклад «Измерение высот формирования излучения в атмосфере пятна на ряде длин волн по наблюдениям трехминутных колебаний»
8. БШФФ-2015, ИСЗФ СО РАН, 2015, Иркутск, устный доклад «Определение высот формирования УФ и КУФ излучения над тенью пятна по наблюдениям трехминутных колебаний»
9. БШФФ-2017, ИСЗФ СО РАН, 2017, Иркутск, устный доклад «Диагностика поперечного распределения температуры в корональных структурах над тенью солнечного пятна по наблюдениям 3-мин колебаний»
10. Всероссийская астрономическая конференция «Небо и Земля», ИГУ, 2016, Иркутск, «Диагностика атмосферы солнечных пятен по наблюдениям трехминутных колебаний»

Кроме того, практической апробацией явилось успешное руководство проектом РФФИ 18-32-00540 мол_а «Сейсмологическая диагностика температурного распределения в корональных структурах солнечных активных областей» и участие в проектах 16-32-00315 мол_а «Исследование вариаций магнитного поля, сопровождающие возникновение корональных

выбросов массы, связанных с эрупцией волокна», 18-32-20165 мол_а_вед «Регулярная пространственно-разрешенная радиомагнитография солнечных активных областей».

Результаты также докладывались и обсуждались на научных семинарах ИСЗФ СО РАН, Иркутск, Университета Марии Складовской-Кюри, Люблин, Польша, Астрономического института Вроцлава, Вроцлав, Польша.

Личный вклад автора. Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы. Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами, причем вклад диссертанта был определяющим. Все представленные в диссертации результаты получены лично автором.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, обзора литературы, 3 глав, заключения и списка литературы из 86 наименований. Общий объем диссертации 96 страниц, включая 22 рисунка и 4 таблицы.

Содержание работы

Во Введении представлена общая характеристика работы, раскрыта актуальность темы исследования, сформулирована цель работы и решаемые задачи, описаны новизна и практическая значимость полученных результатов, перечислены положения, выносимые на защиту. Во Введении дан обзор работ по теме МГД колебаний в солнечных пятнах и связанных с ними корональных структурах.

Первая глава содержит описание методов анализа многоуровневых наблюдений колебаний в атмосфере солнечных пятен.

В разделе 1.1 приведен обзор существующих алгоритмов детектирования колебаний и определения их параметров.

В подразделе 1.1.1 описаны методы обработки данных, направленные на детектирование колебаний и определение их параметров при анализе наблюдений солнечных активных областей. Это задача сопряжена с определенными сложностями, связанными с обнаружением колебательного сигнала на фоне шума и/или широкополосных вариаций интенсивности, а также с его последующим выделением из интегрального сигнала и измерением параметров колебаний, таких как период, амплитуда и фаза. На решение этих проблем направлены разные методы обработки данных. Так, для выделения колебаний из интегрального сигнала и изучения эволюции пространственного распределения мощности колебаний, их периода и фазы авторами статьи [5] был разработан метод попиксельной вейвлет фильтрации (PWF).

А в 2016 года Анфиногентовым и Накаряковым [6] был разработан метод, направленный на решение проблемы детектирования малых поперечных колебаний корональных петель. Данный метод позволяет искусственно увеличить амплитуды поперечных движений в последовательности изображений, сделав колебания более заметными для наблюдателя.

В подразделе 1.1.2 рассмотрены методы, разработанные для определения параметров атмосферы над солнечными пятнами.

Трёхминутные колебания над тенью пятна являются проявлением распространяющихся магнитоакустогравитационных (МАГ) волн. Информация о магнитном поле или температуре, в которой эти волны распространяются, может быть получена, например, через измерение частоты акустической отсечки по наблюдаемому спектру колебаний. Наблюдения частоты акустической отсечки на разных уровнях атмосферы солнечного пятна были использованы авторами работы [7] для определения угла наклона магнитного поля по отношению к радиальному направлению.

Другие методы диагностики атмосферы над пятнами основаны на измерении задержек прохождения волны между разными уровнями солнечной атмосферы. Такая задержка в сочетании с информацией о высотах формирования излучения дает возможность рассчитать скорость распространения колебаний. И наоборот, зная величину измеренной задержки и скорость распространения колебаний от одного излучающего слоя к другому, можно оценить расстояние между различными уровнями атмосферы солнечных пятен. Кобанов и др. [8] измерили задержку между двумя уровнями атмосферы и рассчитали скорость распространения трехминутных колебаний между фотосферой и хромосферой. Полученная скорость оказалась выше, чем скорость звука в соответствующих слоях атмосферы тени пятна. Резникова и др. [9] измерили задержку распространения трехминутных колебаний между уровнями, видимыми в разных каналах SDO/AIA. Так по задержке между каналами 1600 Å и 304 Å они получили скорость звука равную 70 км/с, что значительно превышает ее ожидаемую величину в хромосфере (10 – 30 км/с).

Частичное несоответствие найденных скоростей распространения магнито-звуковой волны и скорости звука в атмосфере солнечного пятна может быть вызвано тем, что реальные высоты формирования излучения не соответствуют высотам, взятым из модели. Таким образом, полученная скорость звука всегда зависит, от того, какая модель формирования излучающих слоев была выбрана. Решением этой проблемы может быть привлечение дополнительной информации о высотной структуре атмосферы тени пятна, полученная практическим путем (наблюдения в микроволновом диапазоне, применение методов МГД сейсмологии).

В разделе 1.2 представлены два метода, разработанные автором настоящей диссертации

ции и основанные на измерениях задержек, наблюдаемых между трехминутными колебаниями, наблюдающимися в разных спектральных линиях. **Метод задержек** [10], основан на предположении, что скорость распространения волн известна и близка к скорости звука. Это предположение применимо, по крайней мере, для верхней хромосферы и короны, где частота акустической отсечки существенно меньше частоты колебаний. Следовательно, расстояние между излучающими слоями, наблюдаемыми орбитальной обсерваторией SDO/AIA, может быть оценено на основании измеренной задержки.

Как уже говорилось, результат интерпретации задержки зависит от выбранной модели атмосферы тени пятна. Поэтому на основе метода задержек был создан **метод задержек и смещений** [11], который не использует каких-либо предположений об относительных высотах формирования излучения или скорости распространения колебаний от одного излучающего слоя к другому. Разработанный алгоритм позволяет одновременно измерить скорость распространения колебаний и относительные высоты формирования излучения, основываясь только на многоуровневых наблюдениях распространяющихся медленных МГД волн и фотосферных магнитограммах.

В подразделе 1.2.1 дано подробное описание метода задержек. Данный метод использует наблюдения медленной магнитозвуковой волны, которая распространяется вверх вдоль силовых линий магнитного поля, последовательно проходя через несколько уровней солнечной атмосферы. Применяемый алгоритм основан на анализе последовательности одновременных изображений солнечного пятна на нескольких длинах волн, формирующихся на разных высотах солнечной атмосферы. Метод включает в себя несколько этапов. Сначала измеряется задержка распространения колебаний для каждого пикселя изображения тени пятна. Затем, проводится статистический анализ полученных значений, в ходе которого определяется среднее значение задержек и соответствующие ошибки измерений. И, наконец, на основе измеренных задержек оцениваются высоты формирования излучающих слоев.

В подразделе 1.2.2 описан метод Смещений и задержек. Этот метод основан на том, что в атмосфере солнечного пятна медленная магнито-акустическая волна распространяется вдоль линий магнитного поля, находящихся под наклоном к лучу зрения [12]. Так как магнитное поле расходится с высотой, то волна, распространяясь вверх, на разных высотах атмосферы тени пятна появляется в разных точках горизонтальной плоскости. Расстояние между точками на разных уровнях атмосферы является проекцией пути, пройденного волной, и может быть измерено из данных наблюдений, также как и время распространения волны. При этом, зная длину проекции пути волны, время ее распространения от одного слоя к другому, и имея информацию о направлении силовых линий магнитного поля по данным

экстраполяции, рассчитывается расстояние между излучающими слоями, и определяется фазовая скорость волны.

Разработанный метод включает в себя следующие этапы: измерение фазовой задержки распространения волны, проекции пройденного ей пути на картинную плоскость, оценка расстояний между излучающими слоями, фазовой скорости волны. Затем применяется дисперсионное соотношение для медленных магнитоакустогравитационных волн и оценивается усредненная скорость звука между излучающими слоями, которая в свою очередь позволяет оценить температуру плазмы.

В конце первой главы приведены ее основные результаты.

Вторая глава посвящена применению разработанных методов сейсмологической диагностики к исследованию атмосферы солнечных пятен по данным наблюдений в УФ и КУФ диапазонах, выполненных на космическом аппарате SDO/AIA.

В разделе 2.1 представлена сейсмологическая диагностика атмосферы солнечных пятен трёх активных областей NOAA 11131, 11582 и 11711, наблюдавшихся вблизи центрального солнечного меридиана 8 декабря 2010, 2 октября 2012 и 6 апреля 2013, соответственно. Использовались последовательности изображений в каналах 1600, 1700, 304, 171 и 193 Å инструмента SDO/AIA. Для определения направления силовых линий магнитного поля, а следовательно и направления распространения медленных магнитозвуковых волн привлекались векторные магнитограммы, полученные инструментом Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) космического аппарата SDO.

Далее в диссертации изложены этапы обработки изображений, выполненной на языке программирования IDL. Первый шаг, заключающийся в интерполяции данных на регулярную сетку, подробно описан в подразделе 2.1.1. Второй шаг — выделение колебательной составляющей из сигнала выполняется путем полосовой Фурье-фильтрации и изложен в подразделе 2.1.2.

В разделе 2.2 представлены результаты обработки данных наблюдений Методом задержек. Для каждой активной области были измерены задержки распространения колебаний, а также определены соответствующие доверительные интервалы. Для этого была составлена и решена переопределенная система уравнений, связывающая измеренные задержки для всех возможных пар каналов и искомые времена распространения волны между соседними излучающими слоями. Расстояние между соседними излучающими слоями было получено как произведение измеренной задержки и предполагаемой скорости распространения волны. Получившиеся временные задержки и эффективные высоты формирования излучения, видимого в разных каналах SDO/AIA, относительно высоты слоя видимого на длине волны

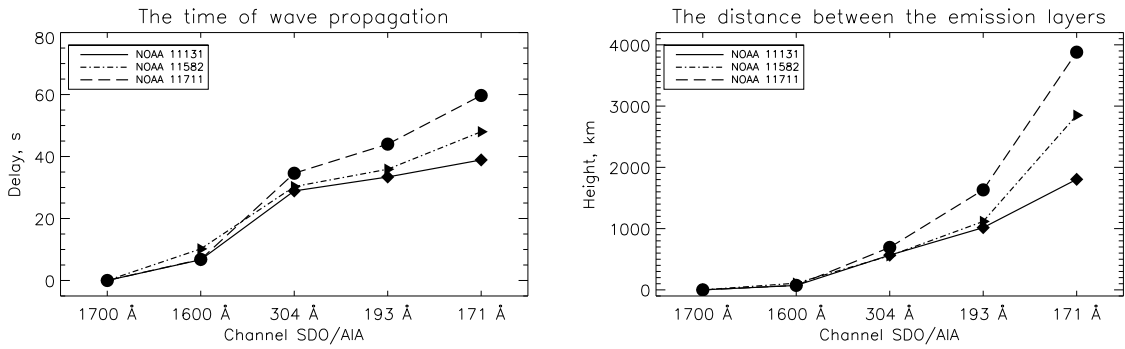


Рис. 1. На графике слева показано время распространения волны от самого нижнего излучающего слоя (канал 1700\AA) ко всем остальным. Разные стили линий соответствуют трём исследуемым активным областям: NOAA 11131, NOAA 11582 и NOAA 11711. Справа показаны высоты формирования излучения, видимого в разных каналах инструмента SDO/AIA, для трёх исследуемых активных областей.

1700\AA представлены на Рис.1

В разделе 2.3 произведена интерпретация результатов. Полученный нами порядок расположения излучающих слоев в целом соответствует росту температуры их формирования, за исключением того, что высота формирования излучения, видимого в «горячем» канале 193\AA , оказалась ниже соответствующей высоты для более холодного канала 171\AA . Полученные нами оценки высот формирования излучения согласуются с современной моделью атмосферы тени солнечного пятна [3], но не вписываются в модель Малтби и др. [2] с протяженной хромосферой.

В разделе 2.4 представлена сейсмологическая диагностика атмосферы солнечных пятен методом задержек и смещений по двухуровневым наблюдениям трёхминутных колебаний. В частности, были измерены: фазовая задержка распространения медленных МАГ волн, расстояние между излучающими слоями, средняя фазовая скорость волн и скорость звука. Было установлено, что среднее расстояние между температурным минимумом (1600\AA) и переходной областью (304\AA) в атмосфере тени солнечного пятна лежит в пределах $500\text{--}800\text{ км}$, а соответствующая фазовая скорость составляет около 30 км/с (см. рис. 2). Оценки температуры дают диапазон $2300\text{--}4300\text{ К}$ и приблизительно соответствует температурному минимуму в тени солнечного пятна. Полученные результаты хорошо согласуются с современной полуэмпирической моделью атмосферы тени солнечного пятна, представленной в работе Фонтенлы и др. [3]. Данная модель отличается наличием протяженного температурного минимума, который простирается вплоть до высоты около 1000 км , где происходит резкий скачок температуры с 3500 К до корональных значений.

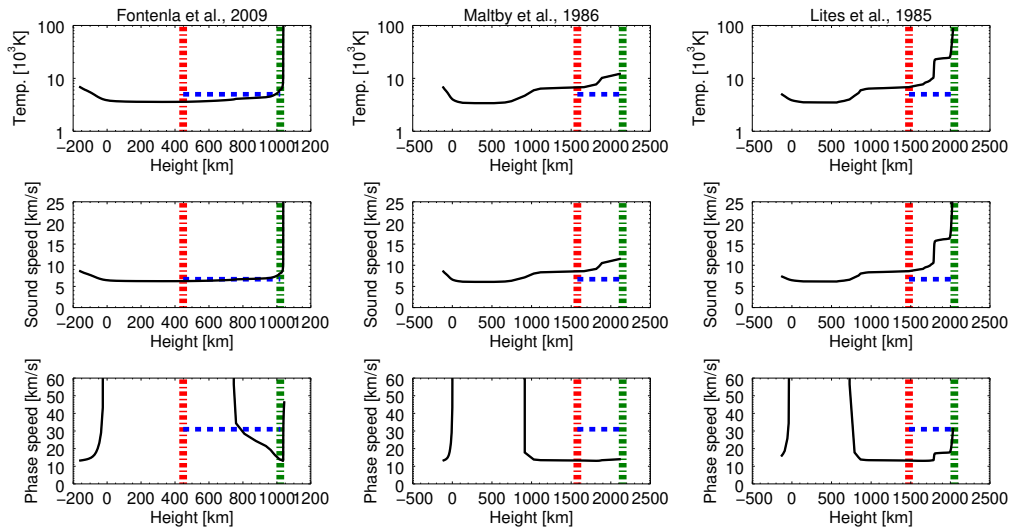


Рис. 2. Сравнение высот формирования излучения, полученных с использованием метода смещений и задержек, в каналах 1600 \AA и 304 \AA SDO/AIA с тремя моделями атмосферы солнечного пятна [2–4]. Высота излучения на 304 \AA (вертикальная зеленая линия) была расположена на высоте, где температура достигает $50,000 \text{ K}$ или же верхнему пределу модели. А высота линии, излучение которой 1600 \AA (вертикальная красная линия), была расположена на расстоянии рассчитанном для активной области NOAA 11131. Горизонтальная голубая линия показывает сейсмологическую оценку фазовой скорости, скорости звука и температуры.

Выводы второй главы представлены в *разделе 2.5*.

Третья глава посвящена диагностике поперечного распределения температуры в корональных структурах по наблюдениям 3-мин колебаний в корональных линиях. Решение этой задачи затруднено тем, что в корональной части солнечных активных областей преобладают достаточно сложные структуры с характерной филаментацией, в которых температура в направлении поперек магнитного поля может меняться очень резко. Изображающие инструменты, работающие в крайнем ультрафиолетовом (КУФ) диапазоне, такие как SDO/AIA, наблюдают излучение интегрированное вдоль всего луча зрения. Поэтому, хотя наблюдения на нескольких длинах и позволяют определить температурный состав плазмы вдоль луча зрения (с помощью расчета дифференциальной меры эмиссии), информация о том, где именно на луче зрения находится плазма с различными температурами, остается недоступной [13].

Решение задач, направленных на диагностику температуры в корональных структурах, возможно только с применением такого сочетания современных программных средств, которое позволит не только произвести численное МГД моделирование волновых процессов в корональной плазме, но и смоделировать синтетические наблюдательные данных на их основе. Таким образом, благодаря совместному использованию МГД кода Lare2D и кода прямого

моделирования КУФ излучения FoMo, у нас появилась возможность корректно сопоставлять численные МГД-модели с имеющимися наблюдениями и определять по ним параметры плазмы корональных структур на Солнце.

В разделе 3.1 обоснована необходимость применения прямого моделирования КУФ излучения для решения задачи сейсмологической диагностики корональных структур.

Раздел 3.2 посвящён численному моделированию распространения медленной МГД волны. Моделирование было выполнено с помощью численного МГД кода Lare2D [14]. Было смоделировано распространение 3-мин. колебаний в корональных структурах, связанных с солнечными пятнами, для двух типов поперечного распределения температуры: холодный центр – горячая периферия и горячий центр – холодная периферия.

В разделе 3.3 подробно описан метод прямого моделирования КУФ излучения по пространственному распределению плотности и температуры плазмы, полученным в ходе численного решения системы МГ-уравнений. Для расчета синтетических КУФ изображений был применен программный код FoMo (<https://wiki.esat.kuleuven.be/FoMo>). Синтетические изображения показывают, как распространение колебаний увидел бы наблюдатель, если бы он наблюдал плазму из нашей численной модели в линиях КУФ диапазона с помощью SDO/AIA. Искусственные изображения были построены для каналов SDO/AIA 171 Å и 193 Å. Синтетические наблюдательные данные имеют одно пространственное и одно временное измерение, так как численное моделирование, выполненное с помощью кода Lare2D, двумерное. Эти данные могут быть напрямую сопоставлены с диаграммами пространство-время, получаемыми из изображений SDO/AIA.

В раздел 3.4 представлены результаты прямого моделирования КУФ излучения от модельной воронкообразной структуры над солнечным пятном. Приведен кросс-корреляционный анализ синтетических изображений, который выявил качественное отличие наблюдений распространяющихся волн в корональных структурах с горячей и холодной сердцевинной. Анализ заключается в расчете функции кросс-корреляции между сигналами на 171 Å и 193 Å для каждой точки искусственных изображений. Затем, определяется коэффициент корреляции, как максимальное значение функции кросс-корреляции и соответствующая ему задержка, определяемая положением этого максимума. На рис. 3 представлены результаты анализа двух моделей: с холодным и с горячим центром.

В случае горячей модели задержка увеличивается с расстоянием от точки в основании корональной структуры. Для модели с холодным центром наблюдается противоположное поведение — задержка уменьшается с расстоянием от основания (см. рис. 3 панели *b* и *e*). Эта зависимость является отличительным признаком при определении поперечного распре-

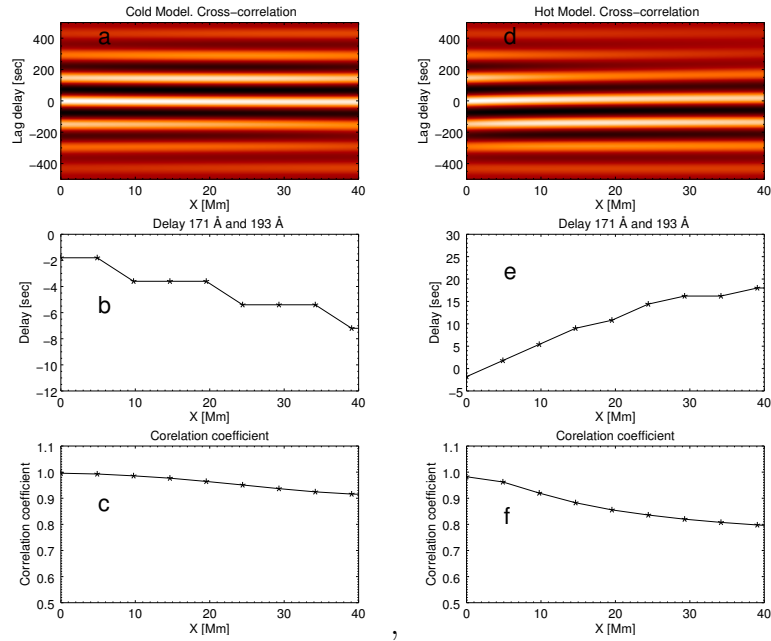


Рис. 3. График кросс-корреляции (панель а), задержка между колебаниями распространяющимися от излучающего слоя на длине волны 171 \AA к 193 \AA (панель b), коэффициент корреляции (панель c) для модели с холодным центром и кросс-корреляция (панель d), задержка (панель e) и коэффициент корреляции (панель f) для модели с горячим центром.

деления температуры в корональных структурах.

В разделе 3.5 результаты анализа реальных наблюдений распространяющихся медленных МГД-волн в воронкообразных структурах над солнечными пятнами. Для исследования были выбраны две активные области NOAA 11582 (2 октября 2012 года) и NOAA 11711 (6 апреля 2013 года). Вдоль каждой корональной структуры в каналах 171 \AA и 193 \AA была размещена искусственная щель, вдоль которой были построены пространственно-временные карты. Затем, для каждой точки щели были рассчитаны коэффициент корреляции и наблюдаемая задержка колебательного сигнала. Полученные результаты представлены на рис. 4.

Проведенный анализ показал, что в проанализированных активных областях задержка колебаний между каналами 171 \AA и 193 \AA увеличивается с расстоянием от основания верней структуры, что соответствует модели корональной структуры с горячей внутренней сердцевиной. Таким образом, согласно проведенной сейсмологической диагностике в обеих активных областях воронкообразные структуры, связанные с солнечными пятнами имеют горячую сердцевину и более холодную периферию.

В разделе 3.6 представлены выводы к третьей главе.

В Заключении сформулированы результаты диссертации.

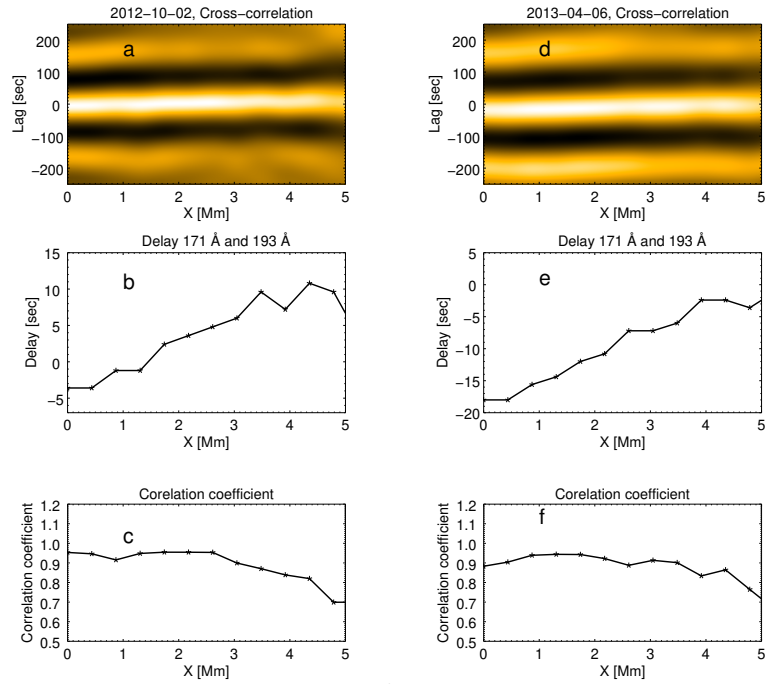


Рис. 4. График кросс-корреляции (панель a), задержка между колебаниями распространяющимися от излучающего слоя на длине волны 171 \AA к 193 \AA (панель b), коэффициент корреляции (панель c) и кросс-корреляция (панель d), задержка (панель e) и коэффициент корреляции (панель f) для исследуемых активных областей: NOAA 11582 (2 октября 2012) - левый столбик, NOAA 11711 (6 апреля 2013) - правый столбик.

1. Разработан и реализован оригинальный алгоритм измерения эффективных высот формирования излучения в различных спектральных линиях для атмосферы тени пятна по задержкам распространения медленных магнитозвуковых волн между наблюдаемыми уровнями солнечной атмосферы (метод задержек). Для расчёта высот используется модельная информация о скорости звука.
2. С помощью метода задержек впервые измерены эффективные высоты формирования излучения на пяти длинах волн УФ и КУФ диапазонов: 171 \AA , 193 \AA , 304 \AA , 1600 \AA и 1700 \AA для ряда активных областей. Полученный порядок расположения излучающих слоев в целом соответствует росту температуры их формирования.
3. Разработан новый алгоритм (метод смещений и задержек) для диагностики температуры и высотной структуры атмосферы солнечных пятен по анализу наблюдений трёхминутных колебаний на двух уровнях солнечной атмосферы. Расстояние между излучающими слоями определяется за счет измерения пространственного смещения медленной МГД волны, возникающего во время ее распространения вверх вдоль расходящихся си-

ловых линий магнитного поля. Метод не требует привлечения модельной информации о скорости распространения волн или о высотах формирования излучения.

4. Методом смещений и задержек произведена диагностика высотной структуры атмосферы тени солнечного пятна методом смещений и задержек. Для ряда активных областей измерено расстояние между температурным минимумом (1600 \AA) и переходной зоной (304 \AA). Также впервые выполнена оценка скорости звука и температуры между указанными слоями с учетом дисперсии и без привлечения модельной информации об их высотах или скорости распространения волн. Согласно проведенным измерениям, расстояние между указанными уровнями атмосферы составляет 500–800 км, а соответствующая температура находится в пределах 2300–4300 К. Полученные значения температуры соответствует типичным значениям температурного минимума в атмосфере над солнечным пятном и говорят об отсутствии протяженной хромосферы над тенью солнечного пятна, что согласуются с новейшей моделью Фонтенлы и др. для атмосферы тени пятна.
5. Разработан метод диагностики поперечного распределения температуры в корональных структурах над солнечным пятном по наблюдениям распространяющихся медленных МГД волн.
6. Изучено поперечное распределение температуры в корональных структурах над тенью солнечного пятна. Анализ веерообразных структур, наблюдаемых в активных областях NOAA 11711 и 11582, показал, что проанализированные веерные структуры имеют горячий центр и холодную периферию.

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 6 печатных работах, из них 2 статьи в рецензируемых журналах, 4 статьи в сборниках трудов конференций. В публикациях автор использует фамилию Дерес, которая впоследствии была изменена на фамилию Кауфман в связи со вступлением в брак.

1. **Дерес А. С.** и Анфиногентов С. А. «Определение высот формирования УФ- и КУФ-излучения над тенью солнечного пятна по наблюдениям 3-минутных колебаний». Астрономический журнал, 2015, том 92, №10, с. 841–850 2015 (англ. версия опубликована в Astronomy Reports)
2. **Deres Anastasiia**, Anfinogentov Sergey, “Probing the Sunspot Atmosphere with Three-Minute Oscillations” Solar Physics, Volume 293, Issue 1, article id. 2, 12 pp., 2018

3. Дерес А. С. и Анфиногентов С. А. «Использование наблюдений 3-минутных колебаний для измерения скорости звука и высот формирования излучения в атмосфере солнечных пятен». Сборник трудов БШФФ-2015
4. Дерес А. С. и Анфиногентов С. А. «Измерение высот формирования излучения в атмосфере пятна на ряде длин волн по наблюдениям трехминутных колебаний», Сборник трудов БШФФ-2013
5. Дерес А. С. и Анфиногентов С. А. «Сейсмологический метод измерения средней скорости звука и высотных расстояний в атмосфере солнечных пятен», Сборник трудов ГАО-2015
6. Дерес А. С. и Анфиногентов С. А. «Диагностика атмосферы солнечных пятен по наблюдениям трехминутных колебаний» , Сборник трудов «Небо и Земля», с. 143

Список литературы

1. De Moortel I., Browning P. Recent advances in coronal heating // Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A. — 2015. — Apr. — Vol. 373, no. 2042. — P. 20140269–20140269. — 1510.00977.
2. A new sunspot umbral model and its variation with the solar cycle / P. Maltby, E. H. Avrett, M. Carlsson et al. // ApJ. — 1986. — Jul. — Vol. 306. — P. 284–303.
3. Semiempirical models of the solar atmosphere. III. set of non-LTE models for far-ultraviolet/extreme-ultraviolet irradiance computation / J. M. Fontenla, W. Curdt, M. Haberreiter et al. // ApJ. — 2009. — Dec. — Vol. 707. — P. 482–502.
4. Lites B. W., Skumanich A. A model of a sunspot chromosphere based on OSO 8 observations // ApJS. — 1982. — Jun. — Vol. 49. — P. 293–315.
5. Sych R. A., Nakariakov V. M. The Pixelised Wavelet Filtering Method to Study Waves and Oscillations in Time Sequences of Solar Atmospheric Images // Sol. Phys.. — 2008. — Apr. — Vol. 248. — P. 395–408.
6. Anfinogentov S., Nakariakov V. M. Motion Magnification in Coronal Seismology // Sol. Phys.. — 2016. — Nov. — Vol. 291. — P. 3251–3267. — 1611.01790.
7. Multi-height observations of magnetoacoustic cut-off frequency in a sunspot atmosphere / D. Yuan, R. Sych, V. E. Reznikova, V. M. Nakariakov // A&A. — 2014. — Jan. — Vol. 561. — P. A19. — 1211.5196.
8. Direct Measurement Results of the Time Lag of LOS-Velocity Oscillations Between Two Heights in Solar Faculae and Sunspots / N. Kobanov, D. Kolobov, A. Kustov et al. // Sol. Phys.. — 2013. — Jun. — Vol. 284. — P. 379–396. — 1302.5164.
9. Three-minute Oscillations above Sunspot Umbra Observed with the Solar Dynamics Observatory/Atmospheric Imaging Assembly and Nobeyama Radioheliograph / V. E. Reznikova, K. Shibasaki, R. A. Sych, V. M. Nakariakov // ApJ. — 2012. — Feb. — Vol. 746. — P. 119. — 1109.5434.
10. Deres A., Anfinogentov S. Probing the Sunspot Atmosphere with Three-Minute Oscillations // Sol. Phys.. — 2018. — Jan. — Vol. 293, no. 1. — P. 2. — 1710.11552.
11. Deres A. S., Anfinogentov S. A. Measurement of the formation heights of UV and EUV emission above sunspot umbrae from observations of three-minute oscillations // Astronomy Reports. — 2015. — Oct. — Vol. 59, no. 10. — P. 959–967.
12. Intensity and Doppler Velocity Oscillations in Pore Atmospheres / K.-S. Cho, S.-C. Bong, V. M. Nakariakov et al. // ApJ. — 2015. — Mar. — Vol. 802. — P. 45.

13. Benchmark Test of Differential Emission Measure Codes and Multi-thermal Energies in Solar Active Regions / Markus J. Aschwanden, Paul Boerner, Amir Caspi et al. // Sol. Phys.. — 2015. — Oct. — Vol. 290, no. 10. — P. 2733–2763. — 1509.07546.
14. A Staggered Grid, Lagrangian-Eulerian Remap Code for 3-D MHD Simulations / T. D. Arber, A. W. Longbottom, C. L. Gerrard, A. M. Milne // Journal of Computational Physics. — 2001. — Jul. — Vol. 171. — P. 151–181.