

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

На правах рукописи



Кауфман Анастасия Сергеевна

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

01.03.03 – Физика Солнца

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель

к. ф.-м. н.

Анфиногентов Сергей Александрович

Иркутск – 2019

Оглавление

Введение	4
Глава 1. Методы диагностики атмосферы солнечных пятен по наблюдениям 3-мин колебаний	31
1.1. Обзор существующих методов	31
1.2. Методы измерения расстояния и средней скорости звука между излучающими слоями.	40
1.3. Выводы к первой главе	52
Глава 2. Измерение высот формирования излучения и фазовой скорости распространения волны	54
2.1. Используемые данные	54
2.2. Результаты обработки данных наблюдений 3-мин колебаний методом задержек	56
2.3. Метод задержек. Интерпретация результатов.	60
2.4. Диагностика атмосферы солнечных пятен методом задержек и смещений	63
2.5. Выводы ко второй главе.	67
Глава 3. Сейсмологическая диагностика поперечного распределения температуры в корональных структурах по наблюдениям 3-мин. колебаний	69
3.1. Необходимость применения метода прямого моделирования	69
3.2. Моделирование распространения медленной МГД волны.	71
3.3. Метод прямого моделирования.	72
3.4. Результаты моделирования.	76
3.5. Наблюдения и их интерпретация	78
3.6. Выводы к третьей главе.	83

Заключение	85
Список литературы	88

Введение

В солнечной короне существует большое разнообразие магнито-гидродинамических (МГД) волн, такие как изгибные колебания и колебания типа перетяжек корональных петель, цуги быстрых магнито-акустических волн, а также наблюдаемые в открытых корональных структурах распространяющиеся медленные магнито-акустические волны. Свойства этих волн зависят от параметров среды, где они распространяются. Например, температура плазмы определяет скорость звука и, следовательно, влияет на фазовую скорость медленных МГД волн, а магнитное поле и плотность плазмы определяют альфвеновскую скорость и, соответственно, фазовую скорость изгибных колебаний и колебаний типа перетяжек в корональных петлях. Эти зависимости могут быть использованы для извлечения информации о параметрах плазмы из наблюдаемых свойств МГД волн. Такая возможность определила новое направление в солнечной физике — МГД сейсмологию [1]. Основная задача МГД сейсмологии заключается в использовании естественно возникающих в солнечной атмосфере волн и колебаний для диагностики параметров плазмы, таких как магнитное поле, плотность и температура. Настоящая диссертация посвящена диагностике плазмы солнечной атмосферы по многоуровневым и многотемпературным наблюдениям медленных МГД волн в атмосфере солнечных пятен.

История изучения колебаний в солнечных пятнах и над ними насчитывает более 40 лет и отражена в большом количестве обзоров [2–13]. Колебания в атмосфере солнечных пятен впервые были открыты Беккерсом и Таллантом [14] в 1969 году. Авторами были обнаружены вариации интенсивности, возникающие с периодичностью около 145 секунд, которые впоследствии были названы вспышками в тени. Джиованелли [15] в 1972 году изучал распределение скоростей вдоль луча зрения в солнечных пятнах по наблюдениям в линии $H\alpha$ и обнаружил колебания с периодом 165 секунд. В дальнейшем колебания в солнечных пятнах были разделены на трёхминутные колебания тени пятна (период

2–4 минуты) и бегущие волны в полутени (период около 5 минут) [11].

Для диагностики солнечной атмосферы особую ценность представляют наблюдения колебаний в нескольких спектральных линиях, соответствующих разным высотам. Первые многоуровневые наблюдения колебаний в солнечных пятнах были проведены в 70-х годах прошлого века [16–18]. Полученные данные были использованы для измерения фазовых задержек между осцилляциями, наблюдаемыми на разных высотах. Джюванелли и др. [16] определили скорость распространения колебаний с периодом около 5 минут по наблюдениям нескольких активных областей. Авторы работы [16] получили разные значения скоростей для разных активных областей, но было точно установлено, что колебания распространяются снизу вверх.

Уэкскуль и др. [17] проанализировали временную серию наблюдений нескольких спектральных линий (Ca II H, K 8498 и 8542 Å; Na D1 и Na D2; Ni I 5893 Å и $\text{H}\alpha$) с помощью вакуумного телескопа Сакраменто. В ходе анализа спектрограмм было обнаружено присутствие 3-мин колебаний, а также было показано, что в тени солнечного пятна могут наблюдаться колебания с разными периодами. Измеренная скорость распространения колебаний составила 10–25 км/с, что значительно ниже скорости Альфвена на соответствующих высотах.

Лайтс и Томас [18] наблюдали колебания в тени пятна одновременно в двух спектральных линиях, соответствующих нижней фотосфере и нижней хромосфере. Наблюдения показали наличие 3-мин и 5-мин колебаний и в обеих спектральных линиях. Для 5-мин колебаний была получена положительная задержка, связанная с их распространением вверх. В то же время, задержка 3-мин колебаний оказалась отрицательной, что по мнению авторов вызвано присутствием гравитационной волны в тени пятна [18].

Активные исследования МГД колебаний над тенью солнечного пятна как теоретические, так и наблюдательные продолжаются и в настоящее время. Обзоры недавних работ можно найти в [8, 19]. Например, Zhugzhda и Locans [20] в своей работе [12] предложили теорию объясняющую спектр трехминутных

колебаний. Сложная спектральная картина, по словам авторов [12], возникает из-за того, что атмосфера солнечного пятна является многополосным фильтром для медленных МГД волн. Для объяснения наблюдаемого спектра была решена задача распространения волн в атмосфере солнечного пятна из фотосферы в корону через температурный минимум и хромосферу. Согласно рассмотренной модели, на границе между соседними слоями атмосферы, где происходит резкое изменение температуры и плотности плазмы, возникают отражённые волны, интерференция которых приводит к появлению выделенных частот в спектре с повышенной прозрачностью для медленных МГД волн. Иными словами температурный минимум и хромосфера образуют многополосный фильтр для медленных МГД волн и формируют тем самым сложный спектр, наблюдающийся у трехминутных колебаний.

Следует отметить, что сложная структура характерна не только для спектра колебаний в пятнах, но и для пространственного распределения их мощности. Колебания с высокой частотой (5–9 мГц) сосредоточены в тени пятна, в то время как низкочастотные наблюдаются больше у периферии. Авторы работы [21] интерпретируют это открытие тем, что угол наклона магнитного поля зависит от расстояния от центра тени солнечного пятна. В центральной части тени пятна магнитное поле вертикально и становится почти горизонтальным на краях полутени.

Кроме того, для пространственного распределения мощности 3-мин колебаний характерна тонкая структура. Колебания с периодами 3-5 минут сосредоточены в ячейках размером порядка нескольких угловых секунд, причем каждая ячейка имеет свой индивидуальный спектр колебаний. Анализ пространственной структуры низкочастотных (0.2 – 1 мГц) колебаний показал, что они структурированы аналогично 3-мин и 5-мин колебаниям. Жугжда и Сыч [22] проанализировали пространственную структуру таких колебаний над солнечным пятном по наблюдениям SDO/AIA. Было обнаружено, что колебания сосредоточены в маленьких областях размером несколько угловых секунд. Как и

в случае 3-мин колебаний каждая такая ячейка имеет свой спектр колебаний.

Для объяснения наблюдаемых свойств 3-мин колебаний было предложено несколько моделей. Одна из таких моделей предусматривает наличие хромосферного акустического резонатора, полость которого находится между фотосферой и переходной областью, а его границы частично отражают медленные магнитоакустические волны. Botha и др [23] сравнили результаты моделирования и наблюдений распространения медленных магнитоакустических волн над тенью солнечного пятна. Была рассмотрена реакция атмосферы солнечного пятна на широкополосные возбуждения: с максимум спектрального распределения энергии выше частоты акустической отсечки и ниже. В обоих случаях стоячие волны формируются в области хромосферы, а бегущие волны просачиваются в корону.

Альтернативной точки зрения придерживаются авторы статьи [24], они утверждают, что результаты наблюдений спектра мощности не согласуются с теорией хромосферного фильтра. Что 3-мин колебания заполняют всю хромосферную область в тени пятна и концентрируются в маленьких областях в короне, которые совпадают с основанием корональных структур. В другой работе [25] для определения природы 3-мин колебаний была проведено моделирование распространения акустической волны в закрытой магнитной трубке, а полученные результаты были сопоставлены с наблюдениями. Авторы работы [25] утверждают, что не получили доказательств

Теоретическое описание распространения 3-мин колебаний в атмосфере Солнца было развито авторами работы [26], которые разработали математическую модель, описывающую динамику линейных продольных медленных магнитоакустических волн в магнитных трубках с изотермически стратифицированной плазмой. Было получено уравнение, которое описывает распространение медленных магнитоакустических волн в магнитных трубках с постоянной температурой. Было обнаружено, что период отсечки для продольных магнитоакустических волн изменяется с высотой, значительно уменьшаясь в плазме

при малых значениях β , и плазме, где β порядка единицы. Области с пониженной частотой отсечки могут влиять на распространение продольных волн вдоль корональных плазменных структур в верхнюю корону, образуя при этом корональные резонаторы.

В работе [27] были исследованы колебания интенсивности и лучевых скоростей в полутени солнечного пятна на различных высотах: от фотосферы до верхней хромосферы. Для это были использованы одновременные спектральные наблюдения в линиях FeI 5123 Å, Mg b1, Na D1/D2, NiI 5893 Å, H α и CaII 8542 Å. Анализ наблюдений показал, что в спектрах мощности скорости присутствуют 5-мин. колебания на уровне нижней хромосферы, локализованные в полутени пятна. А на высотах ниже температурного минимума 5-минутные колебания во внутренней и центральной частях полутени уже не обнаруживаются. В верхнем же слое хромосферы проявляется существенная зависимость частоты колебаний от местоположения. Частота изменяются от 6 мГц на внутренней границе полутени до примерно 1.5 мГц на ее внешнем крае.

Авторы работы [28] изучали поведение 3-мин колебаний в зависимости от температуры в переходной области с использованием таких инструментов как CDS/SOHO и TRACE. Амплита колебаний достигает максимального значения при температуре около 200 000 К, при дальнейшем увеличении температуры амплитуды колебаний уменьшаются. Спектры мощности колебаний очень похожи в хромосфере и переходной области, что противоречит теории фильтрации в солнечных пятнах.

Колобов и др. [29] использовали наблюдения, выполненные на орбитальной обсерватории SDO/AIA и радиогелиографе NoRH, для построения карт пространственного распределения частоты колебаний на разных уровнях атмосферы солнечных пятен. Колебания с малой частотой (1-2 мГц) наблюдаются в корональных структурах, видимых в линиях Fe IX 171 Å. В то время, как колебаний с большей частотой (5-7 мГц) распространяются вдоль вертикальных линий магнитного поля и концентрируются в мелкомасштабных элементах в

тени солнечного пятна, или на границе тень-полутень. Также для оценки угла наклона магнитной трубки в верхних слоях атмосферы солнечного пятна была исследована зависимость основной частоты колебаний от расстояния до центра солнечного пятна. Было выявлено, что угол наклона силовых линий магнитного поля в переходной области над границей тень-полутень составляет примерно 40° .

Среди членов научного сообщества до сих пор нет единого мнения о природе бегущих волн в полутени. Данное явление может быть интерпретировано как реальные волны, распространяющиеся в хромосфере поперек магнитного поля или же как кажущаяся фазовая картина, связанная с магнитоакустическими волнами, распространяющимися вверх вдоль силовых линий магнитного поля. В настоящее время большая часть исследователей поддерживает второй сценарий. Например, авторы статьи [30] продемонстрировав, что бегущие волны в полутени в действительности есть медленные МГД волны, распространяющиеся вдоль силовых линий магнитного поля.

Эта же точка зрения поддерживается авторами работ [31], которые исследовали колебания, наблюдаемые в тринадцати солнечных пятнах в хромосфере, короне и переходной областью инструментами CDS и TRACE. Колебания с периодом близким к 3-ем минутам наблюдаются над тенью каждого пятна. Анализ полученных наблюдательных данных подтверждает предположение, что 3-мин колебания являются распространяющимися вверх акустическими волнами. Это видно из асимметрии амплитуд колебаний в красном и синем крыльях эмиссионных линий. Амплитуда колебания заметно выше в синем крыле, чем в красном. Результаты работы [32] также подтверждают, что 3-мин колебания являются распространяющимися акустическими волнами. Также авторы уточняют, что их наблюдения не совместимы с теорией хромосферного резонатора.

Группа ученых [33] представила результат анализа данных наблюдений с инструментов CDS и MDI. Было получено, что колебания с периодом от 5,4 мГц до 8,9 мГц присутствуют на всех, изучаемых температурах, от температурного

минимума до верхней короны. Была обнаружена хорошая корреляция между колебаниями в различных температурах, с учетом временных задержек. Авторы работы [33] также исследовали изменение относительных амплитуд колебаний в зависимости от температуры. Авторы предполагают, что наблюдаемые колебания происходят из-за медленных магнито-акустических волн.

Авторы работ [34] производили наблюдения 3-мин и 5-мин колебаний с помощью спектрополяриметра одновременно в двух линиях: в фотосфере (Si) и хромосфере (He). И на основе наблюдений сделали вывод, что 3-мин колебания распространяются в хромосферу непосредственно из фотосферы, а не из-за интерференции 5-мин колебаний.

Учеными в работе [35] исследовано пространственное распределения мощности колебаний в диапазоне частот 1–8 мГц для различных высотных уровней атмосферы пятна. Для этого были измерены временные задержки между колебаниями на разных слоях атмосферы пятна. Пространственное распределение мощности 5-мин колебаний выглядит как структура в форме круга, совпадающая с границей солнечного пятна на уровне фотосферы. Этот круг расширяется на более высоких уровнях (He II 304 Å и Fe IX 171 Å), что свидетельствует о распространении низкочастотных колебаний вдоль расходящихся линий магнитного поля. В работе [35] обнаружили, что угол наклона линий магнитного поля достигает 50-60 градусов в верхней хромосфере и переходной зоне.

Филип и др [36, 37] произвели многоуровневые наблюдения колебаний над солнечным пятном. Для наблюдений были использованы совмещенные серии спектров интенсивности в *Ca II H*, поляриметрический спектр *Si I* λ 10,827 и мультиплет *He I* λ 10,830. Было выявлено, что линия *Ca II H* образуется ниже в атмосфере над солнечным пятном, чем линия *He I* λ 10,830, так как временная задержка составила около 20 с при прохождении сигнала. Полученные результаты сравнили с линейным моделированием, модель хорошо описывает высоты до линии *Ca II H*, выше, по мнению авторов, атмосфера не может быть описана линейно.

Авторы работ [34] производили наблюдения 3-мин и 5-мин колебаний с помощью спектрополяриметра одновременно в двух линиях: в фотосфере (Si) и хромосфере (He). И на основе наблюдений сделали вывод, что 3-мин колебания распространяются в хромосферу непосредственно из фотосферы, а не из-за интерференции 5-мин колебаний.

Абрамов-Максимов и др. [38] объединили наблюдения в оптическом и радио диапазоне. Оптические спектральные измерения скорости вдоль луча зрения в фотосферных и хромосферных линиях проводились в Саянской солнечной обсерватории. Радиокарты Солнца были получены с помощью радиогелиографа Нобеяма. Были проанализированы радиоисточники связанные с солнечными пятнами для изучения колебаний. Сравнение вейвлет спектра оптических и радио наблюдений показало временную задержку относительно оптических, что говорит о том, что волна распространяется в теневой магнитной трубке солнечного пятна. Так же использовали наблюдения двух инструментов, SOHO и TRACE для многоуровневых наблюдений 3-мин колебаний авторы работы [39]. Показано, что колебания в переходной области могут быть сформированы акустической волной, распространяющейся вверх. Так же наблюдения с помощью TRACE показали наличие медленных магнитоакустических волн в корональных петлях. Авторы работ [40–42], изучив периоды колебаний, сделали вывод, что колебания распространяются из переходной области в корону.

Сыч и др. в 2012 году [43] проанализировали 3-мин колебания в микроволновом и крайне ультра-фиолетовом диапазоне излучения, генерируемого на разной высоте атмосферы солнечного пятна. В результате было установлено, что 3-мин колебания появляются в виде повторяющихся серий по 8-20 минут. Кристопаули и др. в работах [44, 45] изучали волны в тени и их связь с бегущими волнами полутени. А позже [46] при изучении изменений интенсивности и скорости колебаний во времени авторы применили метод Вейвлет анализа к наблюдениям. Позже Сыч и Накаряков [47] разработали метод, также основанный на Вейвлет анализе, названный Методом по-точечной вейвлет анализ.

Используя микроволновые наблюдения, сделанные с помощью радиогелиографа Нобеяма, авторы работ [48] изучили временные вариации яркости источников, связанных с солнечными пятнами. Во всех исследуемых случаях, были обнаружены колебания с периодом 120-220 с.. Авторы работы предполагают, что такой эффект создают 3-мин волны в солнечных пятнах. Абрамов-Максимов и др. в статье [49] 2011 года также исследовали параметры колебаний и их связь со вспышечной активностью. В частности, авторы заметили 3-мин колебания перед вспышкой. Такое явление они, как и авторы предыдущих работ, ассоциируют с МГД колебаниями в солнечных пятнах. Подобные исследования проводились и другими авторами [50–52].

Несмотря на то, что волновые процессы в солнечных пятнах и короне [12, 28, 53, 54] изучаются уже около полувека, все равно остается много вопросов [8–10]. До сих пор не известно, как высоко в атмосфере распространяются волны, как изменяется частота акустической отсечки, как связаны 3-мин колебания в тени пятна и 5-минутные бегущие волны в полутени, происходит ли процесс нагревания короны из-за переноса энергии волнами.

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 [55] и все еще остается нерешенной, несмотря на существенное развитие как наблюдательных инструментов, так и средств численного и аналитического мо-

делирования. 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 [56–58]. Пожалуй, наиболее популярной моделью атмосферы солнечного пятна является модель Малтби [56]. 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. [57], 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 [56], как и в модели Лайтса [58], атмосфера над тенью пятна имеет хромосферу толщиной около 1000 км, в то время, как модель Фонтенлы [57] 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 отсутству-

ет. 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 изображениях.

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 \AA) и переходной зоной (304 \AA) над тенями солнечных пятен в ряде активных областей, а также измерена усредненная скорость звука и температура между указанными слоями с учетом дисперсионных свойств медленных магнитоакустикогравитационных 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 применении 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 форми-

рования 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.

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

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.

Краткое 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 [47] был разработан метод попиксельной вейвлет фильтрации (PWF). А в 2016 года Анфиногентовым и Накаряковым [59] 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 [60] 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. [61] 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. [21] 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 практически путем (наблюдения в микроволновом диапазоне, применение методов МГД сейсмологии).

В разделе 1.2 представлены два метода, разработанные автором настоящей диссертации и основанные на измерении задержек, наблюдаемых между трехминутными колебаниями, наблюдающимися в разных спектральных линиях. **Метод задержек** [62], основан на предположении, что скорость распростране-

ния 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** [63], 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 накло-

ном к лучу зрения [64]. 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 Mag-

netic 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 1700 \AA представлены на Рис.2.4

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 [57], но не вписываются в модель Малтби и др. [56] с проотяженной 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 500–800 км, а соответствующая фазовая скорость составляет около 30 км/с (см. рис. 2.6). Оценки температуры дают диапазон 2300 – 4300 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. [57]. 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.

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 [65].

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 [66]. 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 вы-

явил качественное отличие наблюдений распространяющихся волн в корональных структурах с горячей и холодной сердцевиной. Анализ заключается в расчете функции кросс-корреляции между сигналами на 171 \AA и 193 \AA 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. 3.5 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. 3.5 панели *b* и *e*). Эта зависимость является отличительным признаком при определении поперечного распределения 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. 3.9.

Проведенный анализ показал, что в проанализированных активных областях задержка колебаний между каналами 171 \AA и 193 \AA увеличивается с расстоянием от основания веерной 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.

Глава 1

Методы диагностики атмосферы солнечных пятен по наблюдениям 3-мин колебаний

1.1. Обзор существующих методов

Интерес к колебаниям в солнечных пятнах связан, в первую очередь, с возможностью их использования для диагностики атмосферы солнечных активных областей с помощью методов МГД сейсмологии. Запуск космического аппарата «обсерватория динамики Солнца» (SDO) с изображающим инструментом AIA на борту позволил проводить наблюдения Солнца на разных длинах волн КУФ диапазона, соответствующих разным температурам плазмы, а следовательно разным высотам солнечной атмосферы. Это открыло возможности развития новых сейсмологических методов диагностики солнечной атмосферы, в том числе над солнечными пятнами, по многоуровневым наблюдениям МГД-волн.

Все имеющиеся на настоящий момент методы можно разделить на несколько больших групп: детектирование колебаний, определение их параметров и определение параметров среды по наблюдаемым колебаниям. К последней группе относятся методы для определения геометрии магнитного поля над атмосферой солнечного пятна по измерениям частоты акустической отсечки [60, 67, 68], а также методы определения фазовой скорости колебаний и/или высоты между излучающими слоями на основании измерений задержек распространения волны [16–18, 21, 61–63].

В этой главе мы подробно рассмотрим вышеупомянутые методы и основные идеи, лежащие в их основе.

1.1.1. Методы обработки данных, для детектирования колебаний в атмосфере солнечных пятен

Анализ данных наблюдений колебаний в атмосфере Солнца позволяет определять параметры плазмы. Однако, сложности возникают еще на первом этапе обработки наблюдательных данных, когда требуется определить наличие колебательного сигнала во временном ряду или последовательности изображений и отделить его от шумовой составляющей и вариаций интенсивности, связанных с неколебательными процессами. Практическая реализация этого этапа часто затруднена ограниченными пространственным разрешением и скважностью наблюдений. Вследствие этого был создан ряд методов, для детектирования и первичного анализа колебаний в условиях зашумленности данных и ограниченности доступного пространственного и временного разрешений. Далее дано описание нескольких методов, разработанных для решения вышеупомянутой задачи.

Метод по-точечной вейвлет Фильтрации

Примером метода, предназначенного для детектирования колебаний в последовательностях изображений, его выделения и измерения параметров может служить метод по-пиксельной вейвлет-фильтрации (PWF), разработанный авторами статьи [47]. Метод основан на непрерывном комплексном вейвлет-преобразовании с использованием материинской функции Морле (1.1). Данный вейвлет хорошо подходит для описания цугов колебаний и характеризуется хорошим компромиссом между разрешением в частотной и временной областях. PWF метод используется для определения пространственной, временной и фазовой структуры источников колебаний в сериях двумерных изображений. PWF анализ позволяет детектировать колебания в заданной полосе частот, определить их тип, а также получать распределение амплитуды, мощности и фазы колебаний в пространстве и времени. Используя данный метод, авторы статьи [47]

определили пространственные структуры источников колебаний, генерируемых в атмосфере солнечного пятна, с периодами 3, 5 и 15 минут в микроволновом и КУФ диапазонах излучения. Было установлено, что колебания с периодом три минуты локализованы в центре микроволнового источника над тенью пятна, а с периодом пять минут находятся на границе тень/полутень.

$$\Psi = \exp(i\omega t) \exp(-t^2/2). \quad (1.1)$$

Метод был протестирован авторами статьи [47] для детектирования колебаний в солнечном пятне и в связанной с ним веерообразной корональной структуре. Одним из примеров работы метода по-точечной вейвлет фильтрации являются созданные авторами работы [47] узкополосные карты мощности (см. рис. 1.1), показывающие пространственное распределение 3-, 5- и 15-мин колебаний для последовательности микроволновых изображений пятенного источника, наблюдаемого на частоте 17 ГГц радиогелиографом Nobeyama. В результате применения PWF метода к данным наблюдений корональной части той же активной области, выполненных космическим аппаратом TRACE на длине волны 171 Å, также были получены карты мощности колебаний. Причем колеблющиеся области, видимые в короне имеют вид вытянутых структур, основания которых пространственно совмещены с колеблющимися областями, наблюдаемыми в хромосфере в микроволновом диапазоне на частоте 17 ГГц. Это является свидетельством того, что трёхминутные колебаний, наблюдаемые на уровне хромосферы и в короне, являются проявлениями одного и того же волнового процесса.

Метод PWF может быть использован для определения природы гармонических или квази-гармонических колебаний и волн по последовательностям их двумерных изображений (куб данных). Метод позволяет различать стоячие и распространяющиеся волны. При этом, авторы метода [47] указывают на то, что при анализе куба данных необходимо учитывать проекционный эффект,

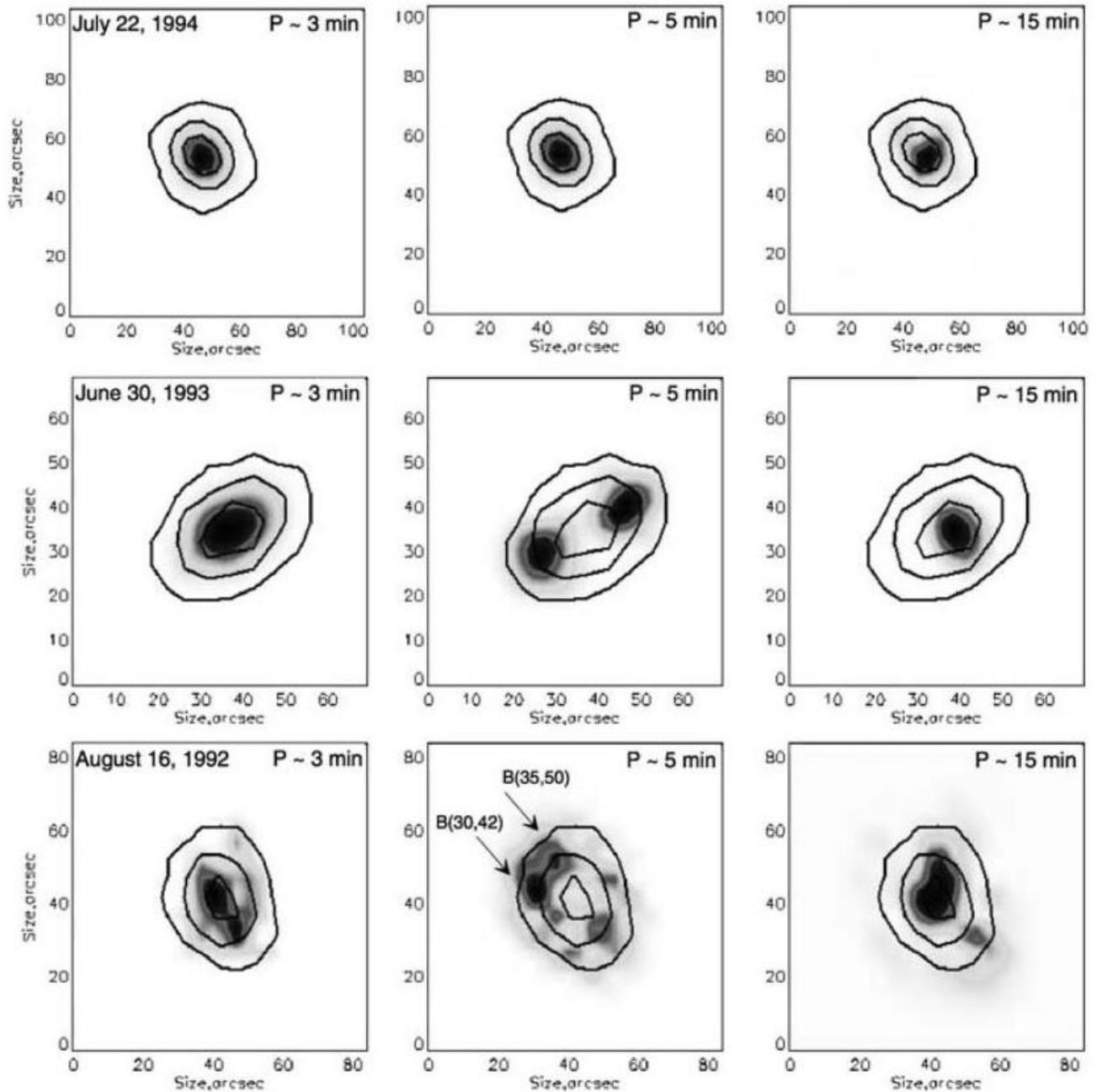


Рис. 1.1. Узкополосные карты пространственного распределения мощности 3-, 5- и 15-минутных колебаний для микроволновых наблюдений трёх активных облаче 22 июля 1994 года, 30 июня 1993 года и 16 августа 1992 года, выполненных радиогелиографом Nobeama на частоте 17 ГГц. Контурами показано распределение яркости источника микроволнового источника над солнечным пятном. Стрелки указывают на области колебаний, в которых наблюдаются колебания в противофазе. Иллюстрация взята из работы [47] с разрешения авторов.

так как проецирование на картинную плоскость приводит к уменьшению наблюдаемого значения фазовой скорости бегущих волн.

Увеличение поперечных движений

Колебания с малой амплитудой не всегда удается обнаружить в серии изображений, так как для таких наблюдений нужны инструменты с большим пространственным разрешением. Поэтому в 2016 года Анфиногентовым и Накаряковым [59] был разработан метод, который помогает обнаружить поперечные колебания с малой амплитудой. Данный метод позволяет искусственно увеличить амплитуды поперечных движений в последовательности изображений, сделав колебаниями более заметными для наблюдателя.

Алгоритм увеличения движений создан для работы с данными космического аппарата SDO/AIA, но может применяться к любой последовательности изображений или кубу данных. Метод основан на двумерном комплексном вейвлет-преобразовании по схеме двойного дерева. Каждое изображение разлагается на набор комплексных высокочастотных изображений различных масштабов и и низкочастотный остаток. Каждый пиксель в высокочастотном изображении представляет собой комплексный коэффициент вейвлет-разложения, фаза которого содержит информация о положении отдельных деталей, расположенных вблизи этого пикселя, а изменение фазы во времени дает информацию о смещениях деталей. В процессе работы алгоритма вариации фазы вейвлет-коэффициентов искусственно увеличивается, что приводит к увеличению всех поперечных смещений в кубе данных после обратного вейвлет-преобразования

Разработанный алгоритм был протестирован как на искусственных данных, имитирующих известные режимы поперечных колебаний корональных петель, так и на серии изображений активной области в КУФ диапазоне, полученной инструментом SDO/AIA на длине волны 171 \AA . Колебания наблюдались в пучке корональных петель на юго-западном лимбе Солнца 21 января 2013 года и не были связаны с какими либо эруптивными процессами. Система петель,

внутри которой наблюдались низко-амплитудные незатухающие поперечные колебания корональных петель, просуществовала более 10 часов. Колебания наблюдались в течении всего этого времени.

Авторы работы [59] применили разработанный метод увеличения поперечных движений к вышеупомянутой системе корональных петель. Полученный результат можно увидеть на рис. 1.2. На исходном рисунке временной карты колебаний с низкой амплитудой заметны только для опытного наблюдателя. Но даже небольшое увеличение амплитуды колебаний (в 3 раза) позволяет увидеть колебания не вооруженным глазом, а увеличение в 9 раз позволяет уже детально исследовать их.

Разработанный авторами статьи [59] метод является хорошим инструментом, для изучения колебаний.

1.1.2. Определение параметров атмосферы

Определение геометрии магнитного поля по частоте акустической отсечки

Магнито-акустико-гравитационные волны (МАГ), распространяясь в атмосфере солнечного пятна, испытывают сильную дисперсию если частота волны близка к частоте акустической отсечки. Свойства этих волн сильно зависят от соотношения частоты волны и частоты акустической отсечки. Волны с частотой ниже частоты акустической отсечки не могут распространяться в стратифицированной атмосфере. Тем самым, частота акустической отсечки определяет минимально возможную частоту МАГ волн, распространяющихся в стратифицированной атмосфере. Таким образом, атмосфера пятна по отношению к МАГ волнам является фильтром высоких частот, в котором пороговая частота определяется частотой акустической отсечки. Последняя зависит от параметров плазмы, таких как температура, локальное значение плазменного параметра β и угла наклона силовых линий магнитного поля. Для областей с малой плаз-

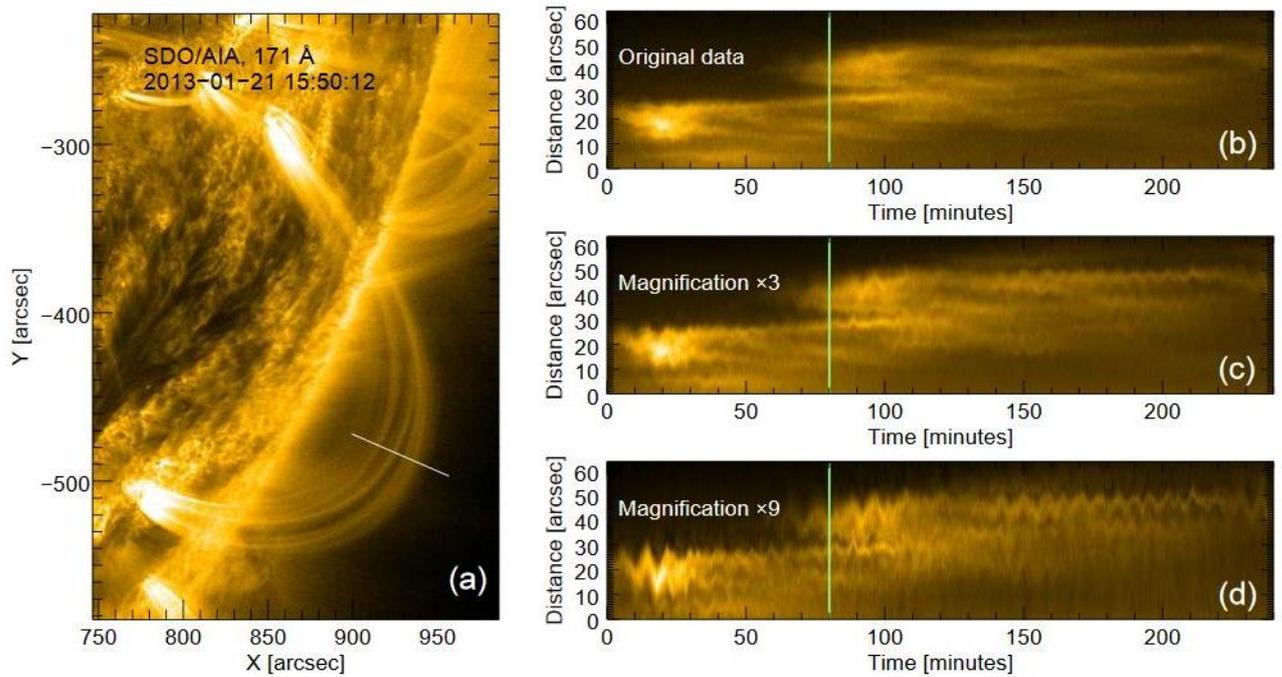


Рис. 1.2. Пример работы метода Увеличения поперечных движений из работы [59]. На панели (a) показано КУФ изображение анализируемой системы корональных петель, наблюдавшихся в канале SDO/AIA 171 Å, 21 января 2013 года. В правой колонке показаны диаграммы пространство-время, созданные на основе исходных данных (b), и обработанные с использованием метода увеличения движения с коэффициентом $k = 3$ (c) и $k = 9$ (d). Вертикальная зеленая линия на графиках (b – d) указывает момент времени, для которого показано изображение на панели (a). Искусственная щель, используемая для построения диаграмм, отмечена прямой белой линией на панели (a). Расстояние измеряется вдоль щели, начиная с ее левого края. Иллюстрация взята из статьи [59] с разрешения авторов.

менной β , таких как солнечные пятна или корона движение плазмы, связанное с медленными магнитозвуковыми волнами происходит преимущественно вдоль силовых линий магнитного поля. Следовательно помимо температуры плазмы T , частота акустической отсечки определяется еще и углом наклона магнитного поля ϕ [69]:

$$\nu_{\text{ac}} = \frac{\gamma g}{4\pi c_s} \cos \phi, \quad (1.2)$$

где g — ускорение свободного падения, γ — показатель адиабаты, а c_s — скорость звука.

Поэтому наблюдения частоты акустической отсечки МАГ волн могут быть использованы для восстановления геометрии магнитного поля над атмосферой солнечных пятен. Так, авторы работы [60] использовали наблюдения частоты акустической отсечки на разных уровнях атмосферы солнечного пятна для определения угла наклона магнитного поля по отношению к радиальному направлению. Они установили, что колебания с периодом менее 3.2 минут преобладают в тени солнечного пятна, а колебания с большими периодами определяются в полутени. Авторы исследований [60, 67, 68] объясняют это явление тем, что частота акустической отсечки зависит от угла наклона линий магнитного поля. Линии магнитного поля выходят из центра пятна и расходятся с высотой. Поэтому, чем больше расстояние от центра солнечного пятна, тем больше угол наклона магнитного поля относительно вертикального направления, а следовательно и меньше частота акустической отсечки. Таким образом, частота колебаний, проникающих в верхние слои атмосферы, зависит от расстояния до центра солнечного пятна. Авторы статьи [60] восстановили геометрию магнитного поля, используя формулу (1.3).

$$\theta = \arccos(\nu_{\text{ac}}/\nu_0), \quad (1.3)$$

где ν_{ac} — локальная частота отсечки МАГ волн, а $\nu_0 = 5.2$ мГц — теоретиче-

ская частота акустической отсечки для тени пятна и вертикального магнитного поля. Наклон магнитного поля, полученный в [60], согласуется с результатом, полученным методом потенциальной экстраполяции магнитного поля. Поэтому метод частоты отсечки можно использовать для получения дополнительной информации о геометрии магнитного поля в активных областях.

1.1.3. Измерение задержки

Информацию о высотной структуре атмосферы солнечного пятна могут дать наблюдения колебаний на разных уровнях солнечной атмосферы. Многоуровневые наблюдения в пятнах с измерением задержек начались еще в 70-х годах прошлого века [16–18]. Тогда было обнаружено, что магнитозвуковые волны, наблюдаемые в виде трехминутных колебаний, распространяются снизу вверх.

Появление новых наблюдательных инструментов с высоким временным разрешением, таких как SDO/AIA, NoRH, привело к потоку новых публикаций, посвященных измерению задержки при прохождении волны от одного излучающего слоя к другому. Измеренная задержка в сочетании с информацией о высотах излучающих слоев 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. [61] 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. Авторы статьи [61] обращают внимание, что интерпретация задержки при прохождении волны от одного излучающего слоя к другому, а так же расчет скоростей зависят от выбора модели атмосферы и, следовательно, высот формирования излучения.

Резникова и др. [21] измерили задержку распространения трехминутных

колебаний между уровнями, видимыми в разных каналах SDO/AIA. Так по задержке между каналами 1600 \AA и 304 \AA они получили скорость звука равную 70 км/с , что значительно превышает ее ожидаемую величину в хромосфере ($10 - 30 \text{ км/с}$). Задержка сигнала между каналами SDO/AIA 304 \AA и 171 \AA соответствует скорости распространения волны 83 км/с . Это значение скорости звука, по мнению авторов работы [21], реалистично, так как соответствующая ему температура $2 \cdot 10^5 \text{ К}$ близка к средней температуре излучающих слоев.

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. А в данный момент существует несколько моделей атмосферы солнечного пятна, существенно отличающихся друг от друга [56, 57]. Например, модель атмосферы солнечного пятна Малтби [56], которая до сих пор используется во многих исследованиях, и более современная модель Фонтенлы [57]. Главное отличие между этими моделями заключается в высоте переходной зоны между хромосферой и короной. В современной модели Фонтенла [57] температура резко увеличивается на высоте 1000 км . над фотосферой до корональных значений. То есть в данной модели отсутствует протяженная хромосфера. Модель Малтби [56], имеет хромосферное плато шириной 1000 км ., на протяжении которого температура возрастает достаточно медленно. Обе модели показаны на рисунке 1.3.

1.2. Методы измерения расстояния и средней скорости звука между излучающими слоями.

В этом параграфе мы представляем два метода, разработанных автором настоящей диссертации и основанных на измерении задержки. В первом методе,

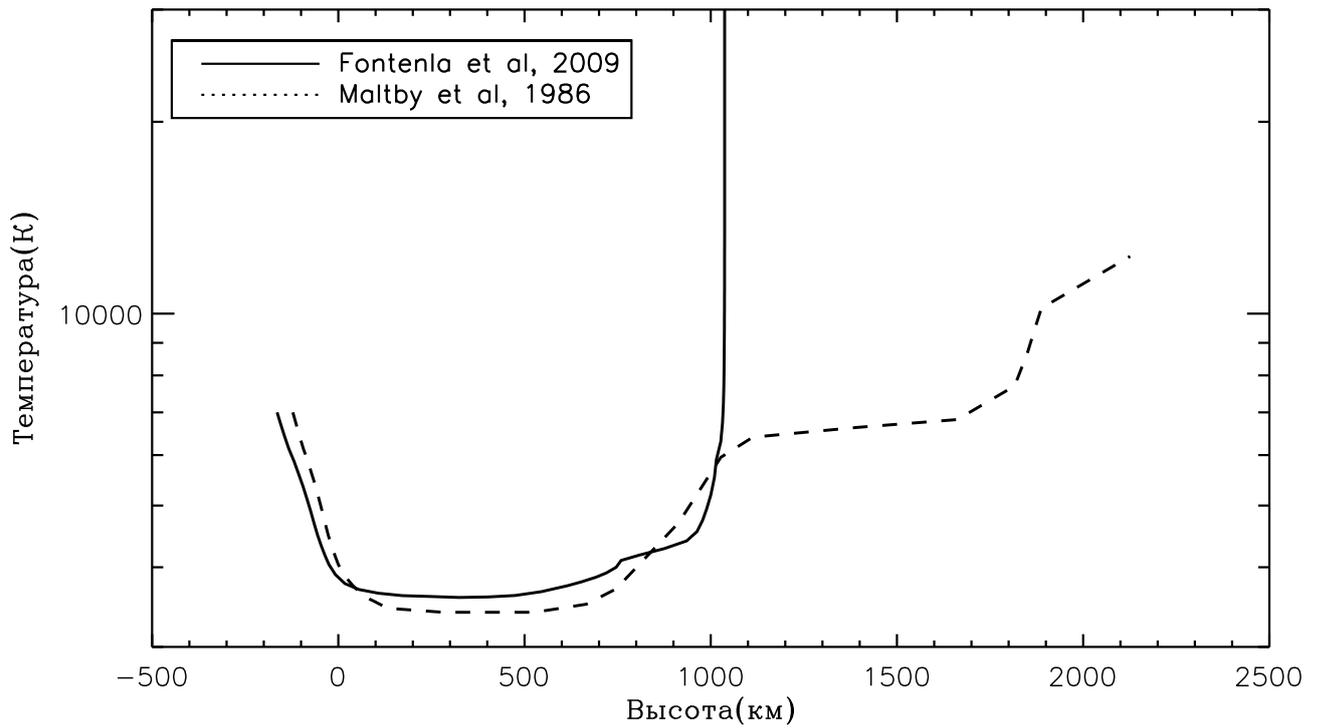


Рис. 1.3. Зависимость температуры от высоты согласно двум моделям атмосферы тени солнечного пятна: штриховая линия – модель Малтби и др. [56], сплошная линия – модель Фонтенлы и др. [57].

в дальнейшем назовем его «**Методом задержек**» (см. раздел 1.2.1) [62], мы исходим из того, что скорость распространения волн известна и равна 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, при разработке второго метода (см. раздел 1.2.2) мы отказались от каких-либо предположений об относительных высотах формирования излучения, или скорости распространения колебаний от одного излучающего слоя к другому. Далее этот метод будем называть «**Методом задержек и смещений**» [63]. Цель состоит в одновременном измерении скорости распространения колебаний и высот формирования излучения только из наблюдений. Более подробно о разработанных методах будет рассказано далее.

1.2.1. Учет направления распространения волн. Метод задержек.

Описание метода

Разработанный метод использует наблюдения медленной магнитозвуковой волны, которая распространяется вертикально вверх от одного уровня атмосферы солнечного пятна к другому. Методика основана на анализе последовательности одновременных изображений солнечного пятна на разных высотах различны длинах волн формирования излучения.

Расчет задержек При измерении задержек необходимо учитывать, что направление распространения волны, как правило, не совпадает с направлением луча зрения. Поэтому возникает проекционный эффект в виде пространственного смещения места наблюдения колебаний в картинной плоскости. Кроме того,

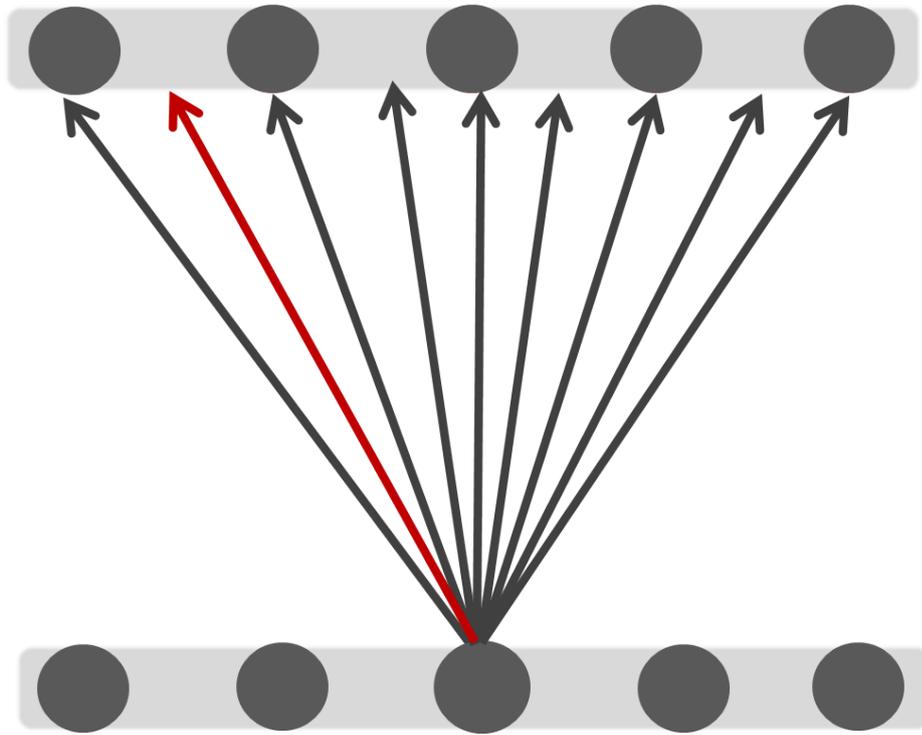


Рис. 1.4. Возможные пути распространения волны (стрелки) от нижнего излучающего слоя к верхнему. Кружками обозначены отдельные пиксели изображения, полученного с помощью SDO/AIA. За реальное направление распространения волны принимается тот путь, где коэффициент корреляции между сигналами от нижней точки и верхней максимален.

дополнительные пространственные смещения обусловлены неточным совмещением изображений в разных каналах. Для того, чтобы определить и учесть эти смещения, на изображениях одного из каналов фиксируется точка, в другом канале перебираются все точки в ближайшей окрестности (см. рис. 1.4). Для каждого варианта определяются коэффициент корреляции и задержка распространения колебаний.

Расчет статистических характеристик. Из всех возможных вариантов, выбирается та пара точек, где коэффициент корреляции сигналов максимальный. Таким образом, для каждой точки изображения получают свои значения коэффициента корреляции и задержки. На этом этапе для активной области рассчитывается среднее значение задержки и ее среднеквадратичное отклонение от среднего. Доверительный интервал оценивается с достоверностью 95 % по Стьюденту. Для расчета статистических характеристик использовались только

те пиксели, в которых коэффициент корреляции превышает 0.6.

Оценка высот излучающих слоев. Трехминутные колебания по общепринятой интерпретации являются медленными магнито-акустико-гравитационными волнами [11, 70]. Гравитация оказывает существенное влияние на них в тех областях, где эффективная частота акустической отсечки (1.4) близка к частоте колебаний:

$$\nu_{\text{ac}} = \frac{\gamma g}{4\pi c_s} \cos \phi \quad (1.4)$$

Здесь $\gamma = 5/3$ – постоянная адиабаты, $g = 274 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения на поверхности Солнца, c_s – скорость звука и ϕ – угол отклонения силовых линий магнитного поля от вертикали. Последний множитель в (1.4) появляется в приближении $\beta \ll 1$, когда магнитное давление преобладает над газодинамическим и, поэтому движение плазмы в волне происходит строго вдоль магнитного поля.

Для 3-мин колебаний гравитация играет существенную роль прежде всего в области температурного минимума. В верхних же слоях атмосферы, таких как хромосфера и корона, частота акустической отсечки (1.4) существенно меньше частоты колебаний (для колебаний с периодом ~ 3 минуты), и следовательно влиянием гравитации на распространение трехминутных колебания в хромосфере и короне можно пренебречь.

Мы также предполагаем, что в хромосфере и короне над тенью солнечного пятна справедливо приближение $\beta \ll 1$, и, следовательно, альвеновская скорость существенно больше скорости звука ($c_a \gg c_s$). Поэтому трубочная или касповая скорость c_t , с которой распространяется медленная магнитозвуковая волна, будет близка к скорости звука:

$$c_t = \frac{c_s c_a}{\sqrt{c_s^2 + c_a^2}} \approx c_s = \sqrt{\gamma \frac{P}{\rho}} = \sqrt{\gamma \frac{kT}{m}}, \quad (1.5)$$

где P – газодинамическое давление, ρ – плотность, k – постоянная Больцмана, T – температура, m – средняя масса частицы в плазме.

Для корональных условий такое предположение подтверждается многочисленными прямыми измерениями скорости распространения МГД-волн в веерообразных структурах, связанных с солнечными пятнами [10, 40, 71, 72]. Скорость распространения колебаний, видимых на изображениях крайнего ультрафиолета, в большинстве случаев оказывалась близкой к скорости звука в короне ($40 - 150$ км/с) [10]. При измерении скорости распространения МГД-волн в корональных структурах с использованием стереоскопических наблюдений на космических аппаратах STEREO A и STEREO B было получено значение 132 ± 11 км/с, равное значению скорости звука при температуре 0.84 ± 0.15 МК [73].

Для оценки скорости распространения волны (см. уравнение (1.5)) использовались температуры формирования излучения, опубликованные на официальном сайте SDO/AIA <http://aia.lmsal.com/public/instrument.htm>. А расстояние между слоями было получено как произведение измеренной задержки и предполагаемой скорости распространения волны.

В главе 2.2 будут описаны используемые данные, полученные результаты скорости и расстояния между излучающими слоями и их интерпретация.

1.2.2. Использование сдвигов и задержки для определения относительных высот без дополнительных параметров. Метод задержек и смещений.

Описание метода. Цель данного метода состоит в определении расстояния и средней скорости между различными уровнями атмосферы солнечного пятна, при условии использования только наблюдательных данных, без каких-либо предположений о скорости или высотах формирования излучения. Алгоритм анализирует две серии изображений солнечного пятна, соответствующих разным высотам, а так же карту вектора магнитного поля, на уровне нижнего

излучающего слоя. В качестве такой карты, можно использовать фотосферную векторную магнитограмму, или же результат экстраполяции поля из фотосферной магнитограммы.

В атмосфере солнечного пятна медленная магнито-акустическая волна распространяется вдоль линий магнитного поля, находящихся под наклоном к лучу зрения [64]. 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, как и время распространения волны. При этом, зная длину проекции пути волны, а так же, время распространения колебаний в сочетании с информацией о направлении распространения колебаний, можно рассчитать расстояние между излучающими слоями, и фазовую скорость волны.

Измерение задержки и проекции пути, пройденного волной. Задержки и проекции пути волны были измерены для каждого пикселя. Для этого, на нижнем излучающем уровне был зафиксирован пиксель (см. рис. 1.4) и рассчитана функция кросс-корреляции вариации яркости фиксированного пикселя со всеми пикселями верхнего уровня в ближайшей окрестности. Таким образом, для каждой пары пикселей была получена фазовая задержка и коэффициент кросс-корреляции. Далее, на верхнем уровне выделялась точка, где коэффициент корреляции максимален. Для того, что бы оценить местоположение точки с наибольшим коэффициентом корреляции с точностью меньше одного пикселя, в данном методе применяется кубическая интерполяция. Прямая линия, которая соединяет точку с нижнего уровня с точкой на верхнем уровне с наибольшим коэффициентом корреляции, дает в результате путь по которому двигалась волна. Так как расстояние между излучающими слоями на данном уровне не известно, то мы можем измерить только его проекцию на горизонтальную плоскость.

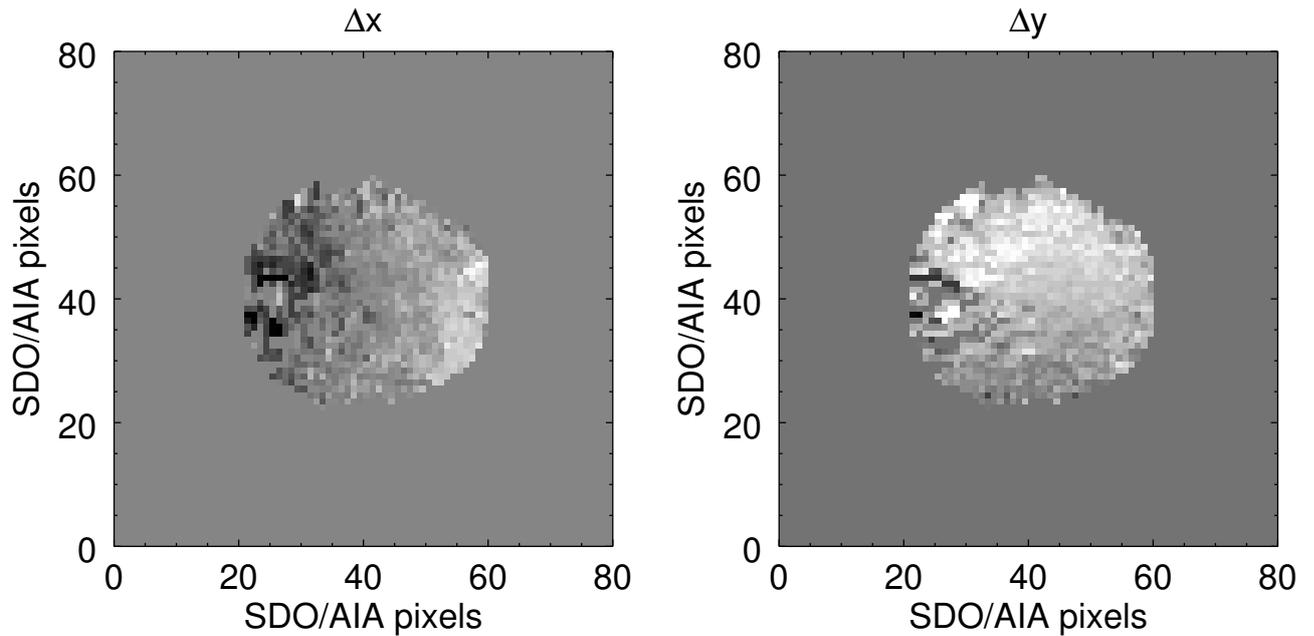


Рис. 1.5. Пространственная карта, на которой для каждого пикселя указано значение проекции пути, пройденного волной от уровня, наблюдаемого на длине волны 1600 \AA , к уровню, наблюдаемому на длине волны 304 \AA , в горизонтальном (левая панель) и вертикальном (правая панель) направлениях.

Повторяя данную процедуру для каждого пикселя на нижнем уровне, нами были получены пространственные карты для следующих параметров: компонента проекции пути, пройденного волной на картинную плоскость Δx и Δy , фазовая задержка τ и коэффициент кросс-корреляции между вариациями яркости на нижнем и верхнем уровнях. Для дальнейшего анализа были выбраны только те пиксели, где коэффициент кросс-корреляции превышал 0.6.

На рис. 1.5 показан пример карты, рассчитанной для наблюдений трехминутных колебаний на длинах волн 1600 \AA и 304 \AA . На карте для каждого пикселя приведено значение проекции пути, пройденного волной. Темный тон указывает на то, что это значение отрицательное, а светлый — положительное. Поэтому темно-светлый градиент на рис. 1.5 указывает на расширение фронта волны с высотой.

Оценка расстояний между излучающими слоями и скорости распространения колебаний Проекция пути, пройденного волной, а так же време-

ни распространения волны от нижнего уровня к верхнему зависит от геометрии магнитного поля. В атмосфере солнечного пятна магнитное поле расходится с высотой. Поэтому фронт волны, распространяясь вверх, тоже должен расширяться, следуя за силовыми линиями магнитного поля.

Проекция пути волны на картинную плоскость $\Delta = \sqrt{\Delta_x^2 + \Delta_y^2}$ зависит от угла α между направлением распространения волны и лучом зрения:

$$\Delta = l \sin \alpha, \quad (1.6)$$

где l – это длина пути, пройденного волной, от одного излучающего уровня к другому.

Так как трехминутные колебания являются медленными магнито-акустическими колебаниями и распространяются вдоль линий магнитного поля, угол α может быть рассчитан из магнитного поля \mathbf{B} , экстраполированного из фотосферных наблюдений на высоту, равную высоте нижнего излучающего слоя (использовалась высота $h_1 = 500$ км.).

В области, где вектор магнитного поля параллелен к лучу зрения ($\alpha = 0$), проекция пути, пройденного волной, в горизонтальной плоскости Δ должна быть равна 0. На левой панели рис. 1.6 показан пример зависимости значения пути Δ_x , пройденного волной, к $B_x/|B|$, измеренной для трехминутных колебаний, наблюдаемых в температурном минимуме и переходной области. $B_x/|B|$ – это угол ϕ_x между вектором магнитного поля B и осью \hat{x} . Если проекция пути Δ_x не равна нулю, когда $\cos(\phi_x) = 0$, это значит, что изображения в разных каналах SDO/AIA неидеально совмещены друг с другом. Для того, чтобы это скорректировать мы использовали аппроксимацию линейной функцией по методу минимизации суммы абсолютных отклонений (LADFIT процедуры из стандартной библиотеки IDL). Полученная функция изображена на рис. 1.6 синей линией. На правой панели рис. 1.6 показан скорректированный результат.

Измеренные компоненты смещения Δ_x , Δ_y и время распространения вол-

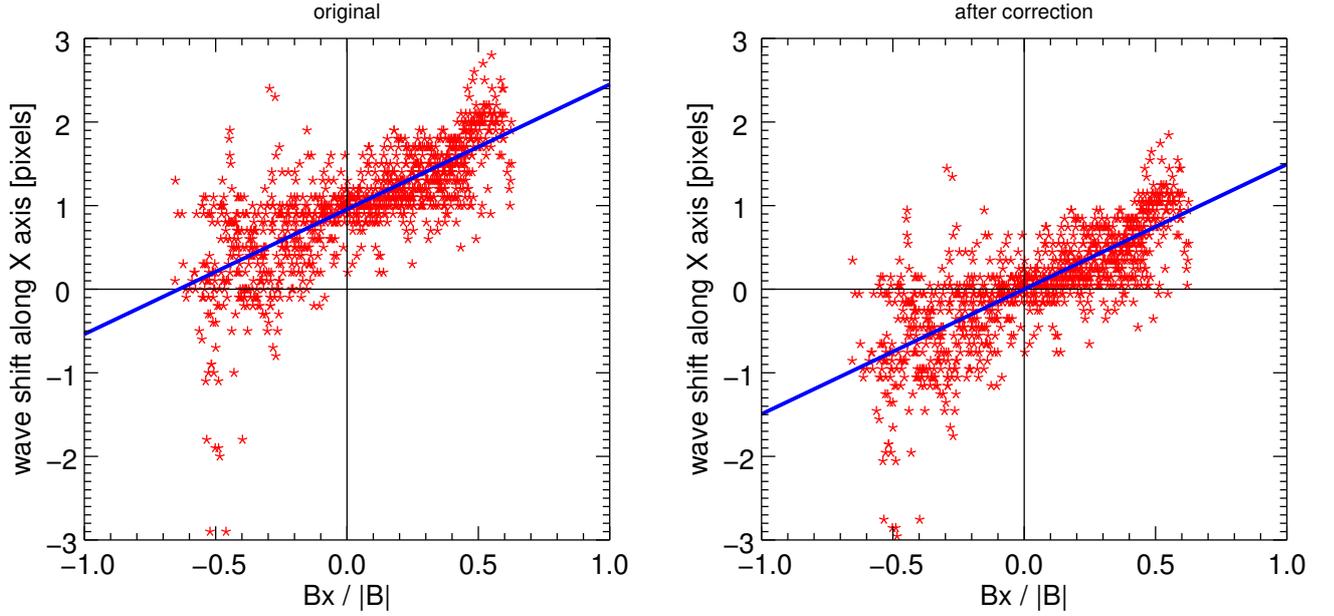


Рис. 1.6. Зависимость проекции пути, пройденного волной, от угла наклона магнитного поля, рассчитанная для активной области NOAA 11131, для длин волн 1600 \AA и 304 \AA . Прямой синей линией изображена вписанная функция, которая определяет угол смещения изображений. На левой панели показан результат до корректировки, на правой - после корректировки.

ны τ позволяют рассчитать расстояние, пройденное волной,

$$l = \frac{\sqrt{\Delta_x^2 + \Delta_y^2}}{\sin \alpha} \quad (1.7)$$

и ее фазовую скорость

$$V = \frac{l}{\tau}. \quad (1.8)$$

Расстояние, пройденное волной l и вертикальное расстояние между излучающими слоями h не всегда совпадают, так как направление распространения волны может быть не перпендикулярно к солнечной поверхности. Для того, чтобы найти расстояние между излучающими слоями h нужно умножить расстояние, пройденное волной l на косинус угла ψ между вектором магнитного поля B и нормалью \hat{n} к солнечной поверхности.

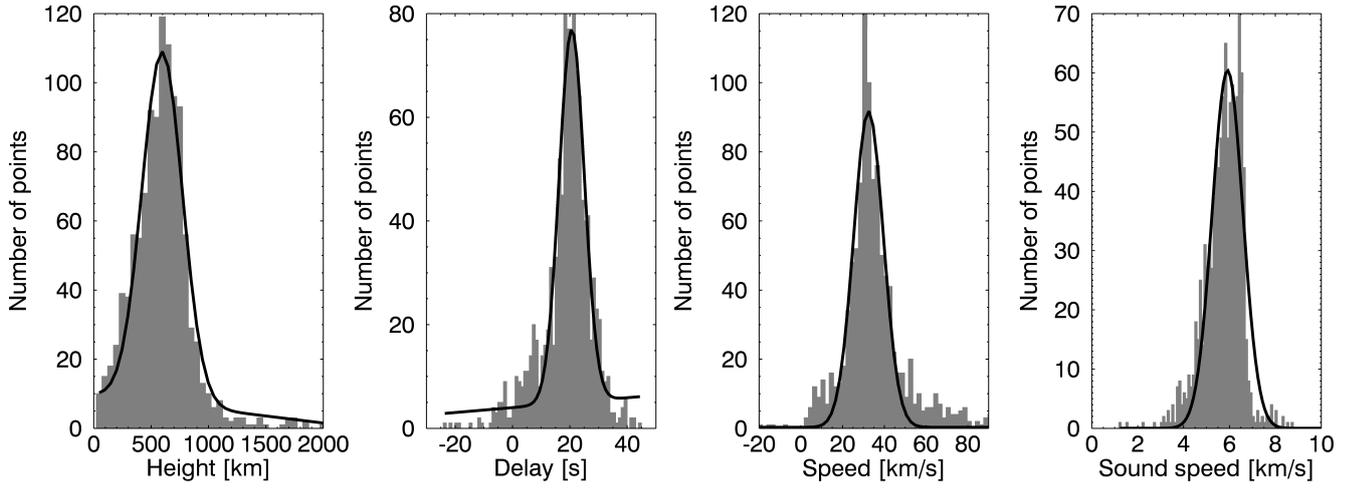


Рис. 1.7. Гистограммы вертикального расстояния (слева направо), фазовой задержки, **средней** фазовой скорости и скорости звука. Черная сплошная линия — вписанная функция Гаусса для определения среднего значения.

$$h = l \cos \psi, \quad (1.9)$$

$$\cos \psi = \frac{n_x B_x + n_y B_y + n_z B_z}{B}. \quad (1.10)$$

Таким образом были рассчитаны средняя фазовая скорость V и расстояние h между излучающими слоями для каждого пикселя.

Далее были рассчитаны среднее значение фазовой скорости, расстояние между излучающими слоями, скорость звука и соответствующие ей температуры, усредненные по всем пикселям изображения.

Оценка скорости звука Для оценки скорости звука из полученных ранее параметров, мы использовали дисперсионное уравнение для МАГ волны в приближении малого значения β

$$\omega^2 = k^2 c_s^2 + \omega_0^2, \quad (1.11)$$

где ω_0 — частота акустической отсечки

$$\omega_0 = \frac{g_0 \gamma}{2c_s} \cos(\alpha) \quad (1.12)$$

с гравитацией на поверхности Солнца $g_0 = 0.274 \text{ км с}^{-2}$, углом $[\alpha]$ распространения волны (т.е. магнитного поля) относительно вертикального направления, и адиабатический коэффициент $\gamma = \frac{5}{3}$.

Фазовая скорость может быть получена из (1.11):

$$v_p \equiv \frac{\omega}{k} = \frac{c_s}{\sqrt{1 - (\omega_0/\omega)^2}}. \quad (1.13)$$

Подставив уравнение 1.12 в уравнение 1.13, мы получаем уравнение для скорости звука $[c_s]$ с двумя возможными решениями:

$$c_s = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{v_p^2 \pm \frac{v_p}{\omega} \sqrt{-g_0^2 \gamma^2 \cos^2(\alpha) + \omega^2 v_p^2}}. \quad (1.14)$$

Этот метод позволяет измерить среднюю фазовую скорость, это означает, что скорость звука, рассчитанная с помощью уравнения (1.12) должна интерпретироваться с осторожностью. Более того, это оценка скорости звука для области с минимальным значением фазовой скорости. Так же, согласно уравнению (1.13) должно соблюдаться следующее условие для нижней хромосферы, когда ω_0 частота отсечки существенно отличается от частоты трехминутных колебаний $\omega \gg \omega_0$, а значение скорости звука все еще мало.

Используя $\alpha = 0$ (волна распространяется вертикально), характерная частота колебаний $\omega = \frac{2\pi}{180\text{s}}$, и среднее значение измеренной фазовой скорости $v_p = 30 \text{ км/с}$ (см. таблицу 2.1), нами были рассчитаны два возможных значения скорости звука: 29.2 км/с («+» в уравнении (1.14)) и 6.7 км/с («-» в уравнении (1.14)).

«Отрицательное» решение ($c_s = 6.7 \text{ км/с}$) соответствует случаю $\omega \gtrsim \omega_0$ и дает нам температуру около 4000 К (предполагая, что плазма слабоионизированна и средний вес частицы $\mu = 1.27m_H$ и $\gamma = 5/3$). Полученные результаты для «отрицательного» решения и среднее значение фазовой скорости и расстояния между излучающими слоями представлены на рис. 1.7, а так же доверительный интервал, с помощью вписывания функции Гаусса в гистограммы

измеренных величин (см. рис. 1.7). Среднее значение величин определено, как положение максимума функции Гаусса, а ее ширина определяет доверительный интервал. Такая температура соответствует температурному минимуму, который является довольно широким слоем в атмосфере солнечного пятна (см. рис. 1.3) и виден в канале SDO/AIA 1600 Å. В температурном минимуме, трехминутные колебания являются высоко дисперсионными и имеют фазовую скорость выше (вплоть до бесконечности), чем скорость звука на этих же высотах.

Второе решение, «положительное», для уравнения скорости звука (1.14) дает нам значение скорости звука $c_s \approx 30 \text{ км/с}$, что соответствует температуре около 40 000 К (считалось, что плазма высоко ионизирована с средним весом частицы $\mu = 0.62 m_H$ и $\gamma = 5/3$). Полученная температура соответствует переходной области между хромосферой и короной. Но в данном слое не могут получиться измеренные фазовые сдвиги трехминутных колебаний, так как температура там очень высокая, а сам слой очень узкий. Поэтому, это решение не реалистично и в дальнейшем анализе мы используем только «отрицательное» решение для уравнения (1.14).

1.3. Выводы к первой главе

В первой главе выполнен обзор методов многоуровневой диагностики атмосферы солнечных пятен по наблюдениям медленных МГД колебаний. В обзор вошли как методы детектирования и выделения колебаний, так и методы, для диагностики атмосферы над солнечными пятнами, включая определение геометрии магнитного поля и измерения скорости звука между различными уровнями атмосферы солнечного пятна.

Кроме того описаны разработанные автором диссертации методы сейсмологической диагностики атмосферы солнечного пятна по многоуровневым наблюдениям трёхминутных колебаний: «Метод задержек» (раздел 1.2.1) и «Метод задержек и смещений» (раздел 1.2.2). Применяемый алгоритм измерения за-

держек учитывает возможные искажения, связанные с неполной пространственной совмещённостью изображений и проекционными эффектами, вызванными тем, что направление распространения волны в общем случае не совпадает с лучом зрения. Для определения фазовых скоростей распространения медленных магнитозвуковых волн используются температуры формирования соответствующих спектральных линий. А фазовая скорость в сочетании с измеренными задержками позволяет рассчитать относительные высоты формирования излучения, видимого в каналах SDO/AIA.

Разработан *метод смещений и задержек* для диагностики атмосферы тени солнечных пятен (метод сдвигов и задержек) основан на анализе многоуровневых наблюдений трехминутных колебаний. Данный метод позволяет независимо оценивать среднюю фазовую скорость медленной магнитозвуковой волны и расстояние между слоями солнечной атмосферы, наблюдаемыми в разных каналах SDO/AIA, и не требует дополнительных предположений и о высотах формирования излучения или фазовой скорости волн. Полученные значения фазовой скорости позволяют оценить усредненную скорость звука между слоями, на которых формируется наблюдаемое излучение, а следовательно и температуру плазмы. Полученная таким образом информация о высотной структуре атмосферы может быть использована для верификации моделей атмосферы над солнечными пятнами.

Глава 2

Измерение высот формирования излучения и фазовой скорости распространения волны

2.1. Используемые данные

Для проведения сейсмологической диагностики атмосферы солнечных пятен по наблюдениям трехминутных колебаний были выбраны 3 активные области: NOAA 11131, 11582 и 11711, наблюдавшиеся вблизи центрального солнечного меридиана 8 декабря 2010, 2 октября 2012 и 6 апреля 2013, соответственно. Для анализа всех этих активных областей использовались данные с космического аппарата SDO/AIA [74]. Были взяты последовательности изображений на длинах волн 1600, 1700, 304, 171 и 193 Å (см. рис. 2.1) длительностью 10 часов для метода задержек и 1600, 304 Å для метода задержек и смещений.

Скважность наблюдений составляет 12 секунд для каналов 171, 193 и 304 Å и 24 секунды для каналов 1600 и 1700 Å. Поэтому для каналов КУФ диапазона последовательность изображений составляет 3000 изображений каждая, а для оставшихся длин волн – 1500 изображений. Для дальнейшей работы изображения были кадррованы до размеров солнечного пятна, а дифференциальное вращение солнца было скомпенсировано. Указанные операции были выполнены на странице центра хранения данных SDO <http://jsoc.stanford.edu>.

Для каждой активной области так же были загружены векторные магнитограммы с космического аппарата Heliospheric Magnetic Imager (SDO/HMI) по времени соответствующие первому изображению из подготовленных ранее данных. Магнитное поле было восстановлено на высоте 500 км в приближении нелинейного бессилового поля, используя программную реализацию оптимизационного метода [75], разработанную Руденко и Мышьяковым [76].

Дальнейшая обработка изображений выполнена на персональном компью-

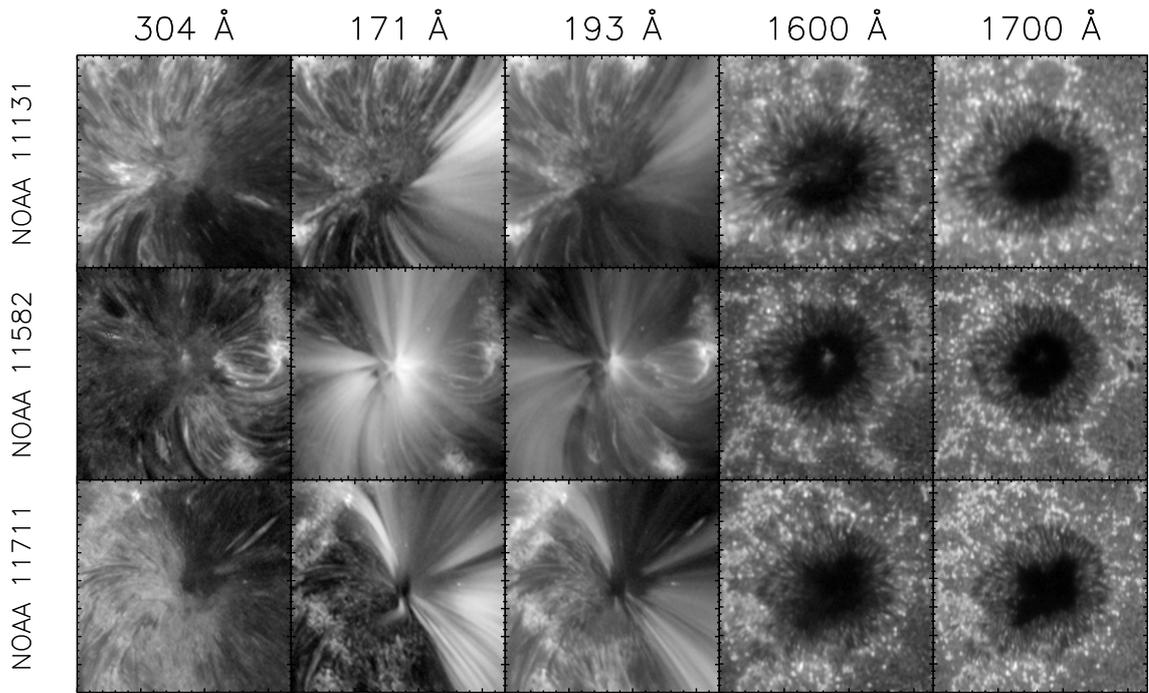


Рис. 2.1. Изображения исследуемых активных областей в различных каналах SDO/AIA.

тере с помощью программы, написанной на языке программирования IDL, и включает в себя следующие этапы: интерполяция данных на регулярную сетку, частотная фильтрация и применение разработанных сейсмологических методов (1.2.1, 1.2.2) Ниже дано подробное описание каждого шага.

2.1.1. Интерполяция данных на регулярную сетку

Разработанные методы требуют регулярности входных последовательностей изображений по времени. В тоже время, в последовательностях изображений возможны пропуски, а время их регистрации в разных каналах может не совпадать. Поэтому для получения правильных задержек распространения волн последовательности изображений в разных каналах должны быть перенесены на одну и ту же сетку, регулярную по времени. Данная операция, а также заполнение пропусков выполняется с помощью метода кубической интерполяции.

2.1.2. Фильтрация

Следующий шаг — это выделение колебательной составляющей из исходного сигнала. Для этого сначала из сигнала вычитаем его сглаженную версию (данное действие убирает медленный тренд), а затем с помощью преобразования Фурье приводим сигнал к спектральному представлению и применяем полосовой фильтр с прямоугольным окном со сглаженными краями в диапазоне периодов от 2 до 4 минут. Отфильтрованный сигнал получаем с помощью обратного преобразования Фурье (см. рис. 2.2).

2.2. Результаты обработки данных наблюдений 3-мин колебаний методом задержек

Используя **метод задержек**, описанный в главе 1.2.1, для каждой выбранной активной области были измерены задержки распространения колебаний, а также соответствующие доверительные интервалы. Полученные в ходе работы результаты представлены в таблицах 2.1, 2.2 и 2.3.

Чтобы получить значения времён распространения волны от слоя к слою, наилучшим образом соответствующие результатам измерений, была составлена

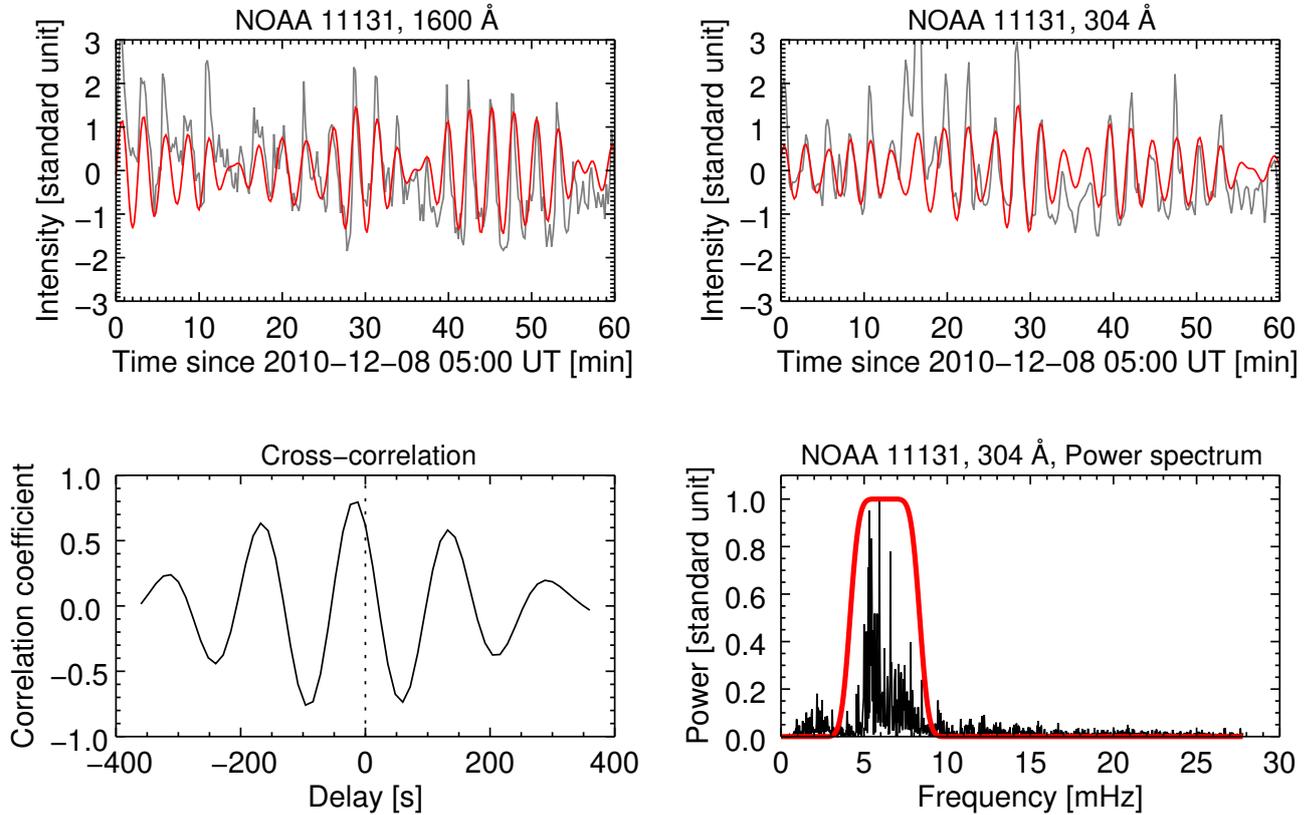


Рис. 2.2. Сигнал интенсивности в центральной точке тени солнечного пятна активной области NOAA 11131 на длине волны 1600 \AA (верхняя левая панель) и 304 \AA (верхняя правая панель) канала SDO/AIA, соответствующая функция кросс-корреляции (нижняя левая панель) и нормализованный силовой спектр с прямоугольным фильтром со сглаженными краями для выделения трех-минутных колебаний (нижняя правая панель). Серая линия — изначальный сигнал, а тонкой красной линией показан фильтрованный сигнал. Чтобы циклы колебаний были хорошо видны, на графиках интенсивности построен только первый час наблюдений, а функция кросс-корреляции и спектр мощности рассчитаны для всего времени наблюдений (10 часов).

Таблица 2.1. Задержки распространения колебаний для активной области NOAA 11131

Длина волны, Å	Задержка, с	Коэффициент корреляции	Средн. ошибка, с	«Хорошие» точки	Дов. интервал, с
1700 и 1600	5.2	0.7	5.8	365	0.59
1700 и 304	29.4	0.8	7	430	0.66
1700 и 171	40.2	0.9	3.3	427	0.31
1700 и 193	33.2	0.7	7.6	373	0.77
1600 и 304	22.8	0.6	8	147	1.3
1600 и 171	32	0.8	6.8	430	0.64
1600 и 193	24.7	0.8	5.8	430	0.55
304 и 171	11.5	0.7	7	401	0.68
304 и 193	4.3	0.7	7.7	168	1.17
171 и 193	-3	0.7	3.5	357	0.36

система уравнений (2.1):

$$\left\{ \begin{array}{l}
 T_{1700} - T_{304} = -29.4, \\
 T_{304} - T_{171} = -11.5, \\
 T_{193} - T_{171} = -3, \\
 T_{1600} - T_{171} = -32, \\
 T_{1700} - T_{171} = -40.2, \\
 T_{193} - T_{304} = 4.3, \\
 T_{1600} - T_{304} = -22.8, \\
 T_{1600} - T_{193} = -24.7, \\
 T_{1700} - T_{193} = -33.2, \\
 T_{1700} - T_{1600} = -5.2, \\
 T_{1700} = 0.
 \end{array} \right. \quad (2.1)$$

Таблица 2.2. Задержки распространения колебаний для активной области NOAA 11711

Длина волны, Å	Задержка, с	Коэффициент корреляции	Средн. ошибка, с	«Хорошие» точки	Дов. интервал, с
1700 и 1600	6.6	0.5	4.4	18	2.18
1700 и 304	34.9	0.5	4.4	61	1.51
1700 и 171	56.3	0.5	13	15	7.19
1700 и 193	47.3	0.5	7.5	18	3.72
1600 и 304	26.6	0.5	5.8	131	1
1600 и 171	51.6	0.6	19.8	78	4.46
1600 и 193	39.5	0.6	7.7	84	1.67
304 и 171	29.6	0.7	13.9	264	1.68
304 и 193	3.8	0.7	8.6	200	1.19
171 и 193	-15.8	0.7	14.5	164	2.23

Система уравнений (2.1) переопределена, то есть число уравнений превосходит число неизвестных. Такие системы уравнений, как правило, не имеют точного решения, и для них ищется так называемое псевдорешение, то есть определяются такие значения неизвестных, которые наилучшим образом удовлетворяют всем уравнениям системы, давая минимальную невязку. Для поиска псевдорешения был использован метод наименьших квадратов с применением сингулярного разложения. Важно отметить, что время распространения волны отсчитывается от самого нижнего слоя из рассмотренных, где формируется излучение на длине волны 1700 Å.

Используя **метод задержек**, описанный в главе 1.2.1, для каждой выбранной активной области было рассчитано среднее значение задержек при распространении волны от одного излучающего слоя к другому. Графики задержек представлены на рис. 2.3, где по вертикальной оси отложено время, а по горизонтальной — каналы SDO/AIA. Расстояние между соседними слоями было

Таблица 2.3. Задержки распространения колебаний для активной области NOAA 11582

Длина волны, Å	Задержка, с	Коэффициент корреляции	Средн. ошибка, с	«Хорошие» точки	Дов. интервал, с
1700 и 1600	14	0.8	16.8	315	1.86
1700 и 304	31.9	0.7	16.9	227	2.21
1700 и 171	43.1	0.7	13.7	87	2.91
1700 и 193	35.4	0.8	12.4	328	1.35
1600 и 304	25.1	0.7	8.4	303	0.95
1600 и 171	38.9	0.7	6.1	124	1.08
1600 и 193	23.3	0.8	8.6	236	1.1
304 и 171	23	0.7	4.2	86	0.9
304 и 193	6.7	0.8	10.2	136	1.72
171 и 193	-10.5	0.7	10.9	95	2.22

получено как произведение измеренной задержки и предполагаемой скорости распространения волны. Получившиеся эффективные высоты формирования излучения, видимого в разных каналах SDO/AIA, относительно высоты слоя видимого на длине волны 1700 Å представлены на Рис. 2.4.

2.3. Метод задержек. 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 Å, оказалась ниже соответствующей высоты для более холодного канала 171 Å. Такой эффект может быть вызван особенностями распределения корональной плазмы с разной температурой вдоль луча зрения. Дело в том, что приближение плоскопараллельной атмосферы мало применимо для солнечной короны, которая

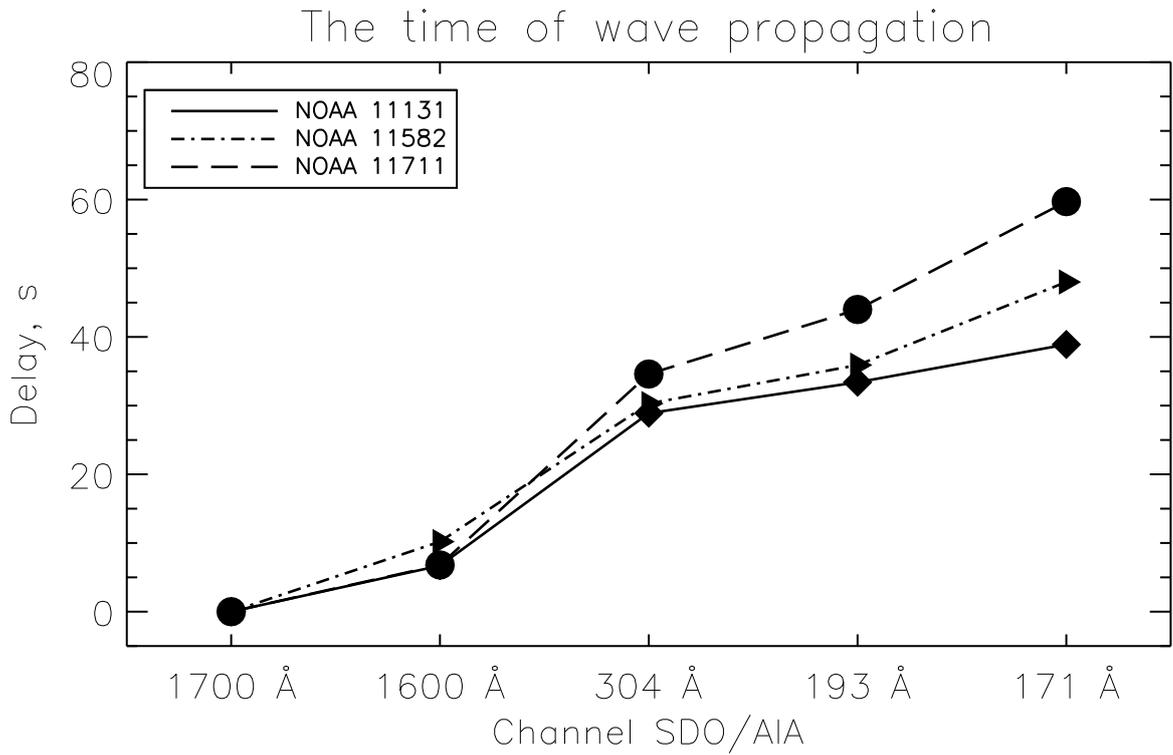


Рис. 2.3. Время распространения волны от одного излучающего слоя к другому для исследуемых активных областей NOAA 11131, NOAA 11582, NOAA 11711.

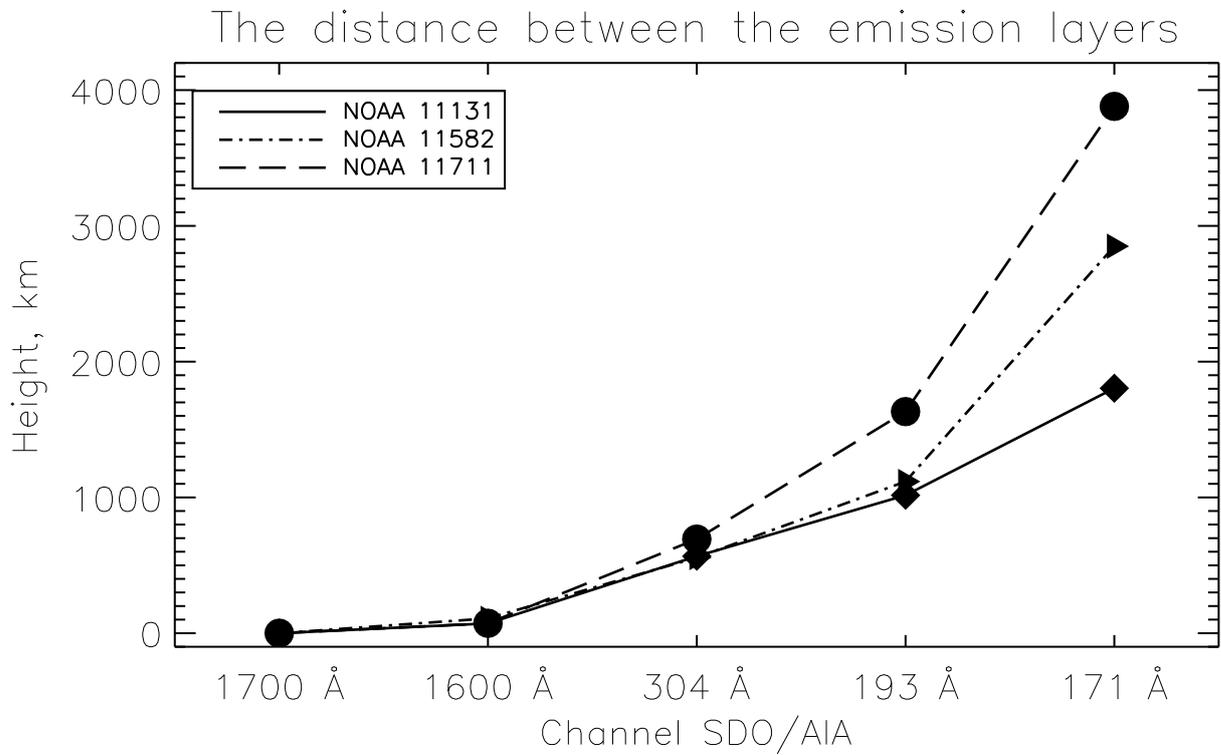


Рис. 2.4. Высота формирования излучения видимого в разных каналах космического аппарата SDO/AIA для исследуемых активных областей NOAA 11131, NOAA 11582, NOAA 11711.

состоит из множества структурных элементов (корональных петель) с отличающейся температурой. Свою роль играет и низкая относительная точность измерений, так как значение задержки между каналами 171 \AA и 193 \AA довольно мало.

Отметим, что исследования высотной структуры атмосферы не ограничиваются только методами МГД сейсмологии. Так Кальтман и др. [77] восстановили высотную структуру атмосферы над солнечным пятном активной области 10933 по данным многоволновых наблюдений в радиодиапазоне на радиотелескопе РАТАН-600. Согласно построенной ими эмпирической модели плазма с температурой $6 \cdot 10^4 \text{ K}$ (304 \AA) и 10^6 K (171 и 193 \AA) находятся на высотах 536 км и 1102 км , соответственно. Эти цифры близки к результатам, представленным в данной работе (см. Рис. 2.4).

На рис. 1.3 представлена зависимость температуры от высоты над видимой поверхностью Солнца согласно двум моделям атмосферы тени пятна. Модель, предложенная Малтби и др. [56] изображена сплошной линией, а модель Фонтенлы и др. [57], — штриховой линией. Эти две модели, как уже говорилось ранее, существенно различаются. В более новой модели [57] на высоте около 1000 км температура скачком поднимается до корональных значений, а характерный для хромосферы широкий слой с медленно меняющейся температурой практически отсутствует. В другой модели [56] есть хорошо выраженное хромосферное плато (толщиной более 1000 км), а температура растет относительно медленно. Полученные нами оценки высот формирования излучения согласуются с современной моделью атмосферы тени солнечного пятна [57], но не вписываются в модель Малтби и др. [56]. С нашей точки зрения, оценки скорости распространения МГД-волн в хромосфере солнечных пятен дают значения существенно превосходящие скорость звука, при использовании моделей с протяженной хромосферой над тенью пятна.

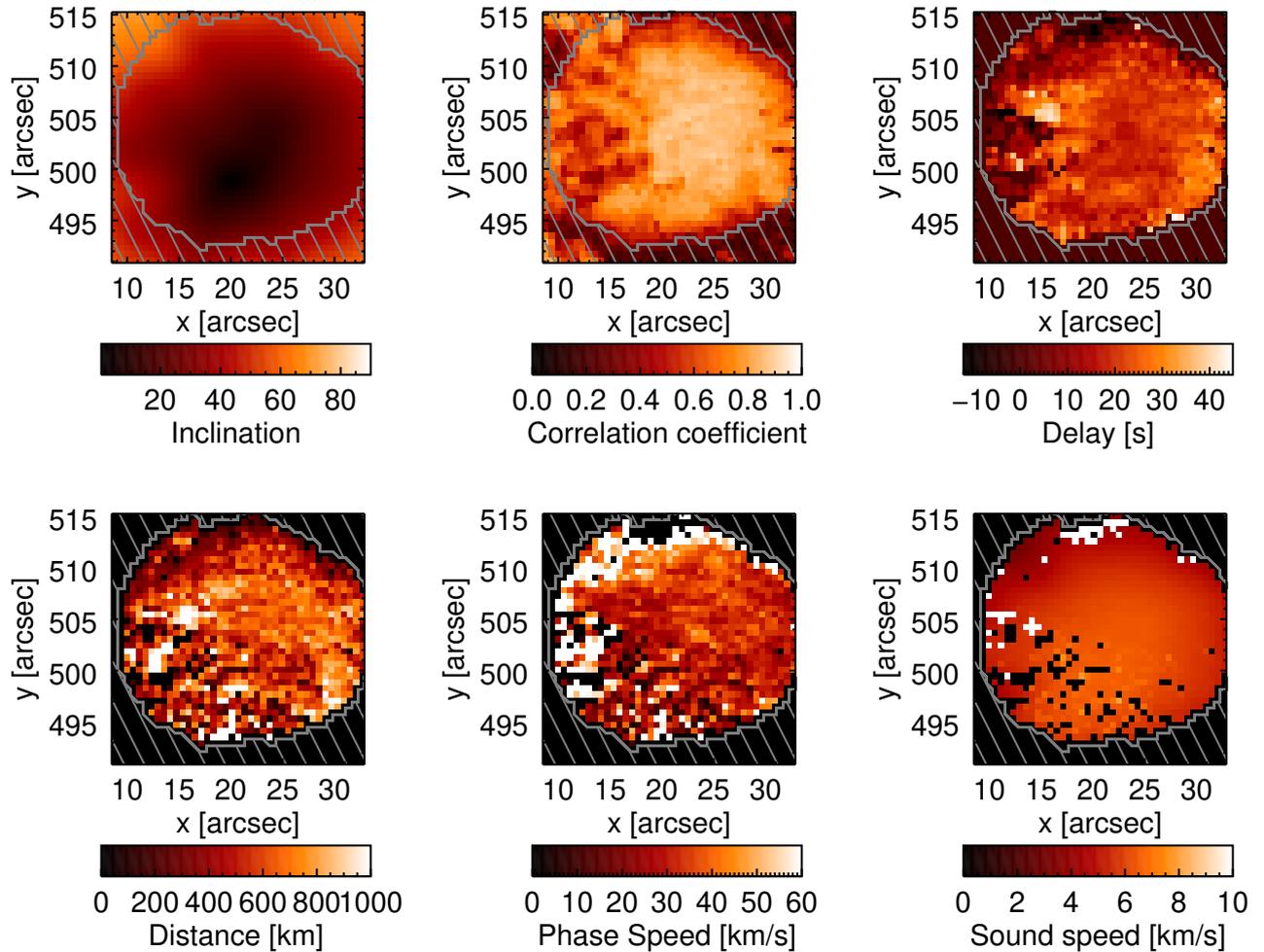


Рис. 2.5. Наклон магнитного поля относительно вертикального направления, коэффициент кросс-корреляции, задержка сигнала, расстояние, фазовая и скорость звука рассчитанные для каждого пикселя активной области NOAA 11131.

2.4. Диагностика атмосферы солнечных пятен методом задержек и смещений

Мы проанализировали данные наблюдений используя метод описанный в разделе 1.2.2. В частности были измерены: наклон магнитного поля, коэффициент кросс-корреляции, задержка распространения медленных МАГ волн, расстояние между излучающими слоями, средняя фазовая скорость волн и скорость звука. Результаты представлены в виде пространственных карт для каждого пикселя для активной области NOAA 11131 на Рис. 2.5. Стоит отметить, что пространственное распределение фазовой задержки не является однород-

Таблица 2.4. Рассчитанные параметры для медленной магнито-акустической волны распространяющейся от температурного минимума (1600 \AA) к переходной области (304 \AA)

NOAA	Расстояние, [км]	Задержка [с]	Фаз. ск., [км с ⁻¹]	Скорость Звука [км с ⁻¹]	Темп., [К]
11131	572 ± 176	20 ± 4	31 ± 7	6 ± 1.0	3300 ± 1000
11582	749 ± 243	25 ± 10	30 ± 10	5 ± 0.7	2300 ± 700
11711	670 ± 320	24 ± 6	29 ± 9	6 ± 0.3	3300 ± 300

ным и демонстрирует те же структуры, что и распределение расстояния между слоями, несмотря на то, что обе величины оценивались независимо. Такое совпадение ожидаемо, так как волне требуется затратить больше времени для покрытия большего расстояния, предполагая, что средняя скорость распространения волны незначительно меняется от одной точки тени пятна к другой.

Среднее расстояние между температурным минимумом (1600 \AA) и переходной областью (304 \AA), фазовая задержка, фазовая скорость и скорость звука для активных областей NOAA 11131, 11582 и 11711 представлены в Таблице 2.4.

Нами было установлено, что среднее расстояние между температурным минимумом (1600 \AA) и переходной областью (304 \AA) в атмосфере тени солнечного пятна равно примерно 500–800 км. Соответствующая фазовая скорость составляет около 30 км/с.

Мы использовали разработанный метод задержек и смещений 1.2.2 для расчета средней фазовой скорости медленной магнитоакустогравитационной волны и расстояния между температурным минимумом (1600 \AA) и переходной областью (304 \AA) над тенью солнечного пятна. Также были выполнены оценки усредненной скорости звука и температуры плазмы. В работе использовались наблюдения трех активных областей [NOAA 11131, 11582, и 1711], выполненные космическим аппаратом SDO/AIA в УФ и КУФ диапазонах 2.1.

Установлено, что расстояние между температурным минимумом и переходной областью лежит в диапазоне 500 – 800 км. А температура находится в диапазоне 2300 – 4300 К (см. Таблицу 2.4), что приблизительно соответствует температурному минимуму в тени солнечного пятна.

Был проведен сравнительный анализ наших измерений с тремя моделями атмосферы тени солнечного пятна [56–58]. На Рис. 2.6 изображены зависимости температуры, скорости звука и фазовой скорости трех-минутных МАГ волн от высоты, а вертикальными линиями показаны излучающие слои в каналах 1600 Å и 304 Å а также найденные средние значения температуры, скорости звука и фазовой скорости распространения колебаний между этими уровнями. На Рис. 2.6 хорошо видно, что наши результаты хорошо согласуются с более современной эмпирической моделью атмосферы тени солнечного пятна [57], для которой характерен резкий скачок температуры на высоте около 1000 км над фотосферой с 3500 К до корональных значений. Остальные модели [56, 58] не согласуются с нашими измерениями, так как хромосфера в этих моделях присутствует широкого (~ 1000 км) слоя с медленно-меняющейся температурой, что не согласуется ни с измеренными расстояниями, ни с оценками температуры.

Так же независимая информация о высоте переходного слоя была получена авторами статьи [78] из наблюдений в микроволновом диапазоне, выполненных на инструменте РАТАН-600. В упомянутой работе также был обнаружен крутой рост температуры в переходной области атмосферы тени солнечного пятна на высоте 1 Мм. Авторы статьи [78] объясняют это явление тем, что атмосфера над пятном неоднородна: переходная область расположена между тенью и полутенью солнечного пятна, что приводит к размытию по высоте. Данная проблема, по словам авторов [78], может быть решена в будущем с помощью наблюдений с приборов, способных получить двумерные радио-карты.

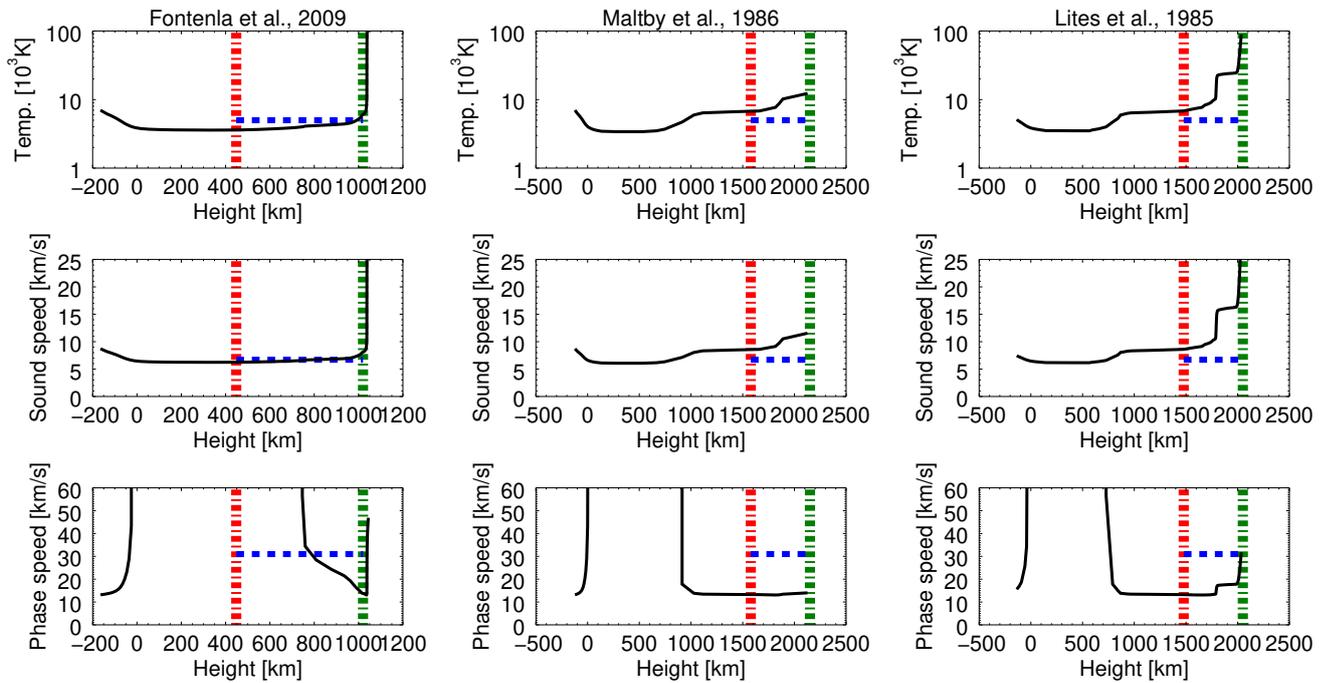


Рис. 2.6. Сравнение полученных высот формирования излучения, полученных с использованием метода смещений и задержек, в каналах 1600 \AA и 304 \AA SDO/AIA с тремя моделями атмосферы солнечного пятна [56–58]. Высота излучения на 304 \AA (вертикальная зеленая линия) была расположена на высоте, где температура достигает $50\,000 \text{ K}$ или же вверх модели. А высота линии, излучение которой 1600 \AA (вертикальная красная линия), была расположена на расстоянии рассчитанном для активной области NOAA 11131 (см. Таблицу 2.1). Горизонтальная голубая линия показывает сейсмологическую оценку фазовой скорости, скорости звука и температуры.

2.5. Выводы ко второй главе.

Мы проанализировали наблюдения трех активных областей [NOAA 11131, 11582, и 1711] в УФ и КУФ диапазонах двумя разработанными методами: *методом задержек* и *методом смещений и задержек*. В первом случае 3-мин колебания над тенью солнечных пятен были использованы в качестве сейсмологических инструментов для оценки высот формирования излучения, видимого в каналах SDO/AIA (1700, 1600, 304, 171 и 193 Å). Во втором случае проводилась диагностика нижних слоев атмосферы от температурного минимума до переходной зоны по наблюдениям в каналах 1600 Å и 304 Å.

Анализ данных методом задержек, несмотря достаточно большие погрешности, позволяет с уверенностью определить порядок следования большинства излучающих слоев и оценить их высоту относительно самого нижнего слоя 1700 Å. Полученный порядок расположения излучающих слоев в целом соответствует росту температуры их формирования, за исключением того, что высота формирования излучения, видимого в «горячем» канале 193 Å, оказалась ниже соответствующей высоты для более «холодного» канала 171 Å. Такой эффект может быть вызван особенностями распределения корональной плазмы с разной температурой вдоль луча зрения. Дело в том, что приближение плоскопараллельной атмосферы мало применимо для солнечной короны, которая состоит из множества структурных элементов (корональных петель), отличающихся друг от друга температурой и плотностью. Свою роль играет и малая величина фазовой задержки между каналами 171 Å и 193 Å, которая приводит к довольно большим относительным ошибкам.

Полученные нами оценки высот формирования излучения находятся в согласии с моделью атмосферы тени солнечного пятна [57], но противоречат широко используемой модель Малтби и др. [56]. С нашей точки зрения, именно отсутствием протяженной хромосферы над тенью пятна объясняется тот факт, что оценки скорости распространения МГД-волн в хромосфере солнечных пя-

тен дают значения, существенно превосходящие скорость звука, если высоты формирования спектральных линий берутся из моделей, в которых протяженная хромосфера есть.

В случае *метода смещений и задержек* в качестве исходных данных, для оценки вертикального расстояния, средней фазовой скорости, скорости звука и соответствующей ей температуры использовались изображения SDO/AIA зарегистрированные на длинах волн 1600 \AA и 304 \AA . Измеренное этим методом расстояние между температурным минимумом (1600 \AA) и переходной областью (304 \AA) составляет примерно 500–800 км, а соответствующая температура находится в пределах 2300–4300 К, что соответствует условиям температурного минимума в атмосфере над солнечным пятном и свидетельствует в пользу существования протяженной зоны температурного минимума над тенью солнечных пятен.

Проведен сравнительный анализ соответствия полученных результатам трём моделям атмосферы солнечного пятна [18, 56, 57]. Установлено, что результаты проведенной сейсмологической диагностики нижних слоев атмосферы над солнечным пятном хорошо согласуются с более новой полуэмпирической моделью атмосферы тени солнечного пятна [57], для которой характерен резкий скачок температуры на высоте около 1000 км над фотосферой с 3500 К до корональных значений. Данный результат согласуется с результатами, полученными *методом задержек*.

Глава 3

Сейсмологическая диагностика поперечного распределения температуры в корональных структурах по наблюдениям 3-мин. колебаний

3.1. Необходимость применения метода прямого моделирования

Для решения задачи сейсмологической диагностики поперечного распределения температуры в корональных структурах по наблюдениям 3-мин. колебаний был применен метод прямого моделирования (англ. *forward modelling*). Применение прямого моделирования обосновано тем, что анализ наблюдений магнитоакустических волн в короне затруднен 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. Это явление схематично изображено на Рис. 3.1. Изображающие инструменты, работающие в крайнем ультрафиолетовом (КУФ) диапазоне, такие как SDO/AIA, наблюдают излучение интегрированное вдоль 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 неизвестной [65]. Эти обстоятельства существенно осложняют интерпретацию полученных наблюдений и требуют использования дополнительной информации, в частности сейсмологической, для определения тепловой структуры корональных образований.

С нашей точки зрения решение этих задач возможно только с приме-

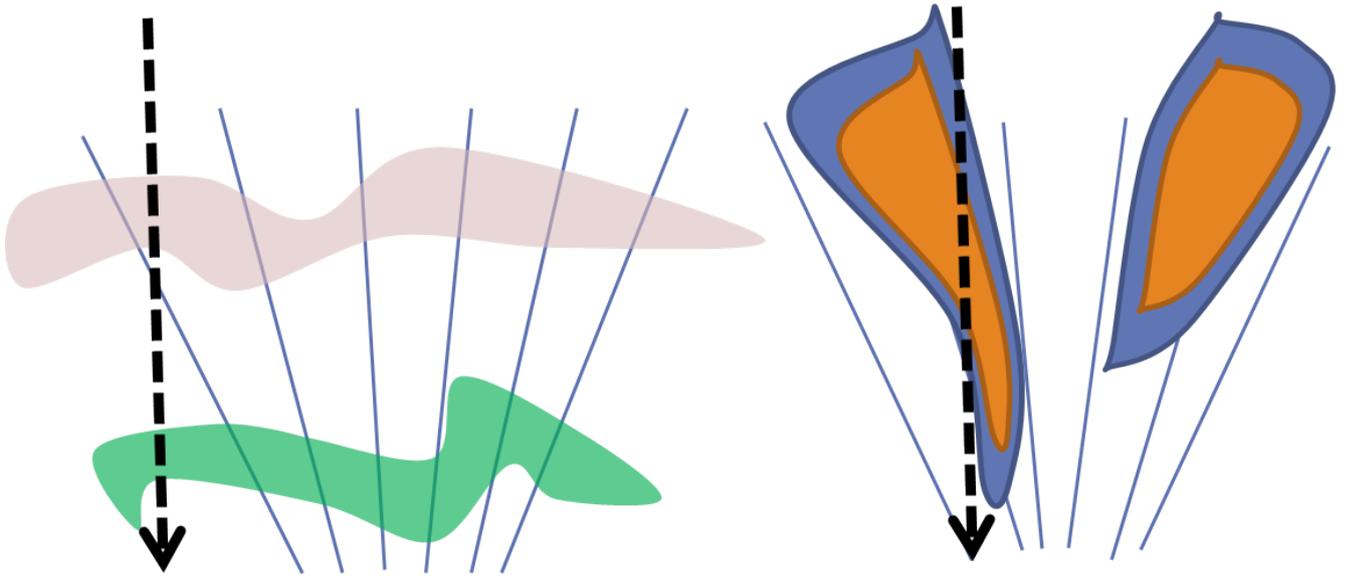


Рис. 3.1. Особенности корональных источников КУФ излучения. Вертикальные расходящиеся линии - это линии магнитного поля. Цветами показана разная температура плазмы, а вертикальная стрелка указывает направление вдоль которого инструмент SDO/AIA интегрирует излучение, для получения изображения в заданном излучающем канале. На левой панели схематично изображены излучающие слои в хромосфере и переходной области (1600, 1700 и 304 Å) над тенью солнечного пятна. На правой панели схематично изображены излучающие слои в корональной области (171, 193, 211, 131, 335 и 94 Å) над тенью солнечного пятна.

нием такого сочетания современных программных средств, которое позволит не только произвести численное МГД моделирование волновых процессов в корональной плазме, но и смоделировать синтетические наблюдательные данные на их основе. Таким образом, благодаря совместному использованию МГД кода Lage2D и кода прямого моделирования КУФ излучения FoMo, у нас появилось возможность корректно сопоставлять численные МГД-модели с имеющимися наблюдениями и определять по ним параметры плазмы корональных структур на Солнце.

3.2. Моделирование распространения медленной МГД волн.

Для интерпретации наблюдений медленных МГД волн в корональных структурах было проведено численное моделирование распространения МГД волн в расходящихся магнитных структурах в короне. Моделирование было рассчитано с помощью кода Lare2D [66]. Lare2D является лагранжевым кодом для численного решения системы МГД уравнений в двух измерениях. Код имеет точность второго порядка для расстояния и времени и использует градиентный предел, который позволяет коду реализовывать нелинейную волновую динамику.

В рамках настоящей работы 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 и холодная периферия. Компоненты магнитного поля в обоих моделях выбраны как

$$\begin{aligned} B_x &= B_0 \exp(-\lambda y) \sin(\lambda x), \\ B_y &= B_0 \exp(-\lambda y) \cos(\lambda x), \end{aligned}$$

где $1/\lambda \approx 42$ Мм — параметр, ответственный за изменение магнитного поля с высотой, и $B_0 = 600$ Гс — напряженность магнитного поля в основании короны.

Температура плазмы и её плотность в основании короны заданы как

$$T_0 = T_{\text{ext}} + (T_{\text{int}} - T_{\text{ext}}) \exp\left[\left(-\frac{x}{R}\right)^4\right], \quad (3.1)$$

$$n_0 = n_{\text{ext}} + (n_{\text{int}} - n_{\text{ext}}) \exp\left[\left(-\frac{x}{R}\right)^4\right], \quad (3.2)$$

где T_{int} и T_{ext} — температура плазмы внутри и снаружи корональной структуры, соответственно, $R = 5$ Мм — характерный радиус корональной структуры,

и $n_{\text{int}} = 1.0 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$ и $n_{\text{ext}} = 0.2 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$ — плотность плазмы внутри и снаружи корональной структуры. Корональная структура в моделировании является более плотной, чем окружающая плазма. Для температуры внутренней части структуры и её окружения были заданы следующие значения: $T_{\text{int}} = 0.7 \text{ МК}$, $T_{\text{ext}} = 1.0 \text{ МК}$, для модели с холодной центральной частью и $T_{\text{int}} = 1.0 \text{ МК}$, $T_{\text{ext}} = 0.7 \text{ МК}$ для модели с горячей центральной частью.

Температура плазмы во всём объеме модели была задана постоянной вдоль силовых линий магнитного поля и равной значениям в основании этих линий согласно формуле (3.1). В качестве начального распределения плотности использовалось барометрическое распределение, определяемое уравнением (3.2). В такой модели равновесие существует только вдоль линий магнитного поля, но не поперек их.

Благодаря малому значению плазменного параметра β , это отклонение от равновесного состояния не велико и система быстро релаксирует после начала численного счета. При этом, однако, возникают распространяющиеся МГД-волны, запертые внутри объема численной модели. К счастью, эти волны имеют малую амплитуду относительно моделируемого цуга медленных волн и поэтому не заметны в синтетических наблюдениях, показанных на рис. 3.2 и 3.3, и никак не влияют на измеренные задержки.

3.3. Метод прямого моделирования.

Для того что бы на прямую сравнить моделирование и наблюдения, группой ученых [79] был разработан код FoMO, который используя параметры моделирования создает синтетические изображения. Синтетические изображения — это то, как бы наблюдатель видел распространение колебаний если бы он наблюдал плазму из нашей численной модели в линиях КУФ диапазона.

Впервые FoMo код был использован [80] в 2013 году для определения характеристик сосисочной моды МГД волны по наблюдениям интенсивности и

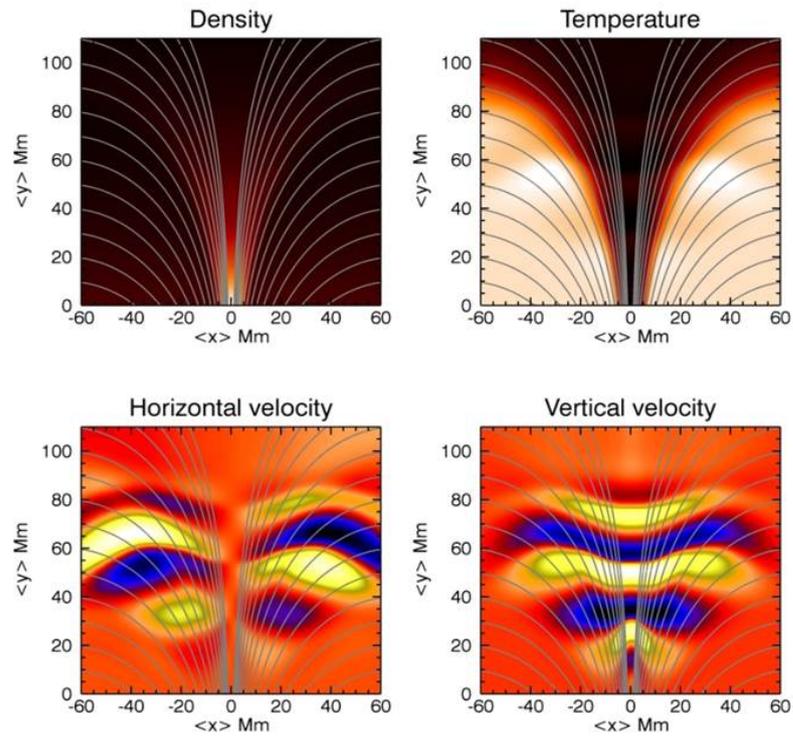


Рис. 3.2. Моделирование распространения медленной МГД волны в корональной структуре. Холодная центральная часть (0.7 МК) и горячая периферия (1 МК). Серые расходящиеся линии — линии магнитного поля. На верхней левой панели показано распределение плотности, на правой верхней панели — распределение температуры, на левой нижней распределение скорости в горизонтальном направлении и на правой нижней панели — распределение вертикальной скорости.

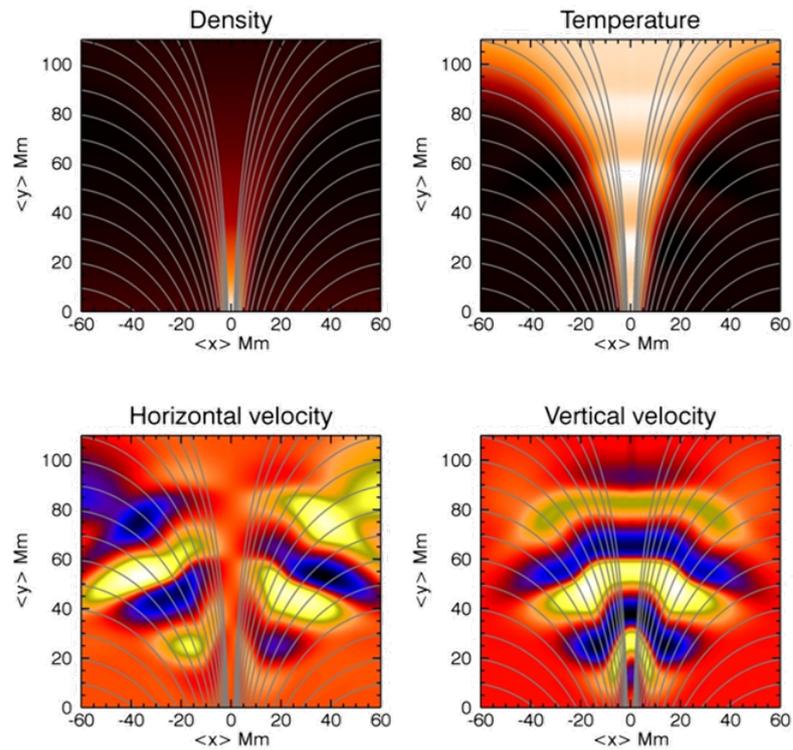


Рис. 3.3. Моделирование распространения медленной МГД волны в корональной структуре. Горячая центральная часть (1 МК) и холодная периферия (0.7 МК). Серые расходящиеся линии — линии магнитного поля. На верхней левой панели показано распределение плотности, на правой верхней панели — распределение температуры, на левой нижней — распределение скорости в горизонтальном направлении и на правой нижней — распределение вертикальной скорости.

спектральным линиям. А позже и другими научными группами [81–86].

Основное предназначения программного кода FoMo — синтез профилей излучения в оптически тонких спектральных линиях на основе вычислительных данных. Код FoMo рассчитывает удельную интенсивность свечения плазмы, интегрированную вдоль выбранного луча зрения. Расчеты проводятся в приближении оптически тонкой среды, когда наблюдаемая яркость определяется формулой (3.3).

$$I_{\lambda} = A_b g_{\text{eff}} f_{\lambda_0} \int G_{\lambda_0}(T, n_e) n_e^2 dl, \quad (3.3)$$

где A_b — относительное содержание элемента (для спектральной линии, для выбранной длины волны λ) в сравнении с концентрацией водорода, g_{eff} — фактор Гаунта, f_{λ} — параметр, характеризующий интенсивность формирования спектральной линии, $G_{\lambda_0}(T, n_e)$ — функция вклада, в основном зависящая от температуры и характеризующая отклик плазмы для конкретной линии, n_e — концентрация электронов, а T — температура плазмы. Интегрирование производится вдоль луча зрения, пересекающего излучающего модельный объем с плазмой.

Код FoMo находится в открытом доступе <https://wiki.esat.kuleuven.be/FoMo/> и распространяется в двух вариантах для C++ и IDL. Согласно автору кода, обе версии на одинаковых входных данных дают одинаковые результаты. В данной работе была использована версия, предназначенная для использования в IDL. Код FoMo способен рассчитывать синтетические изображения для разных углов обзора. Для сравнения с реальными наблюдениями был выбран угол зрения 30 градусов относительно вертикального направления. Такой угол соответствует ситуации, когда активная область находится вблизи центрального солнечного меридиана.

Мы создали искусственные изображения для каналов SDO/AIA 171 Å и 193 Å. Синтетические наблюдательные данные имеют одно пространственное

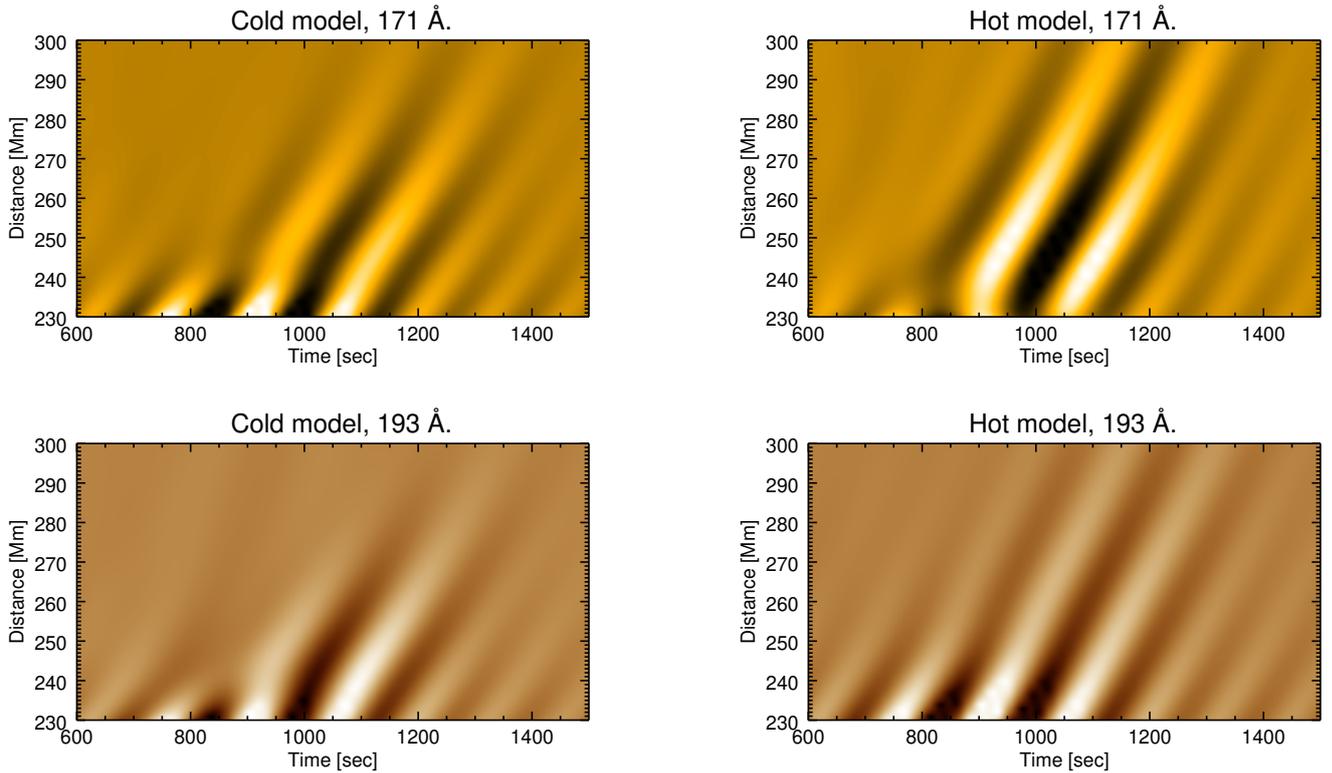


Рис. 3.4. Пространственно-временная карта для численно смоделированной распространяющейся МГД волны

и одно временное измерение, так как численное моделирование, выполненное с помощью кода `Lage2D`, двумерное. Синтетические изображения, созданные с помощью кода `FoMo` показаны на рис. 3.5 в виде пространственно-временных карт. Наиболее хорошо на этих пространственно-временных картах видна серия наклонных периодичных полос, которая является проявлением медленной МГД-волны, распространяющейся вверх.

3.4. Результаты моделирования.

Нами были проанализированы синтетические изображения, полученные с помощью `FoMo`, чтобы определить разницу при наблюдении распространения волн в корональных структурах с горячим центром и холодным. Сначала мы рассчитали функцию кросс-корреляции между сигналами на 171 \AA и 193 \AA для каждой точки. Затем, мы получили коэффициент корреляции, как максималь-

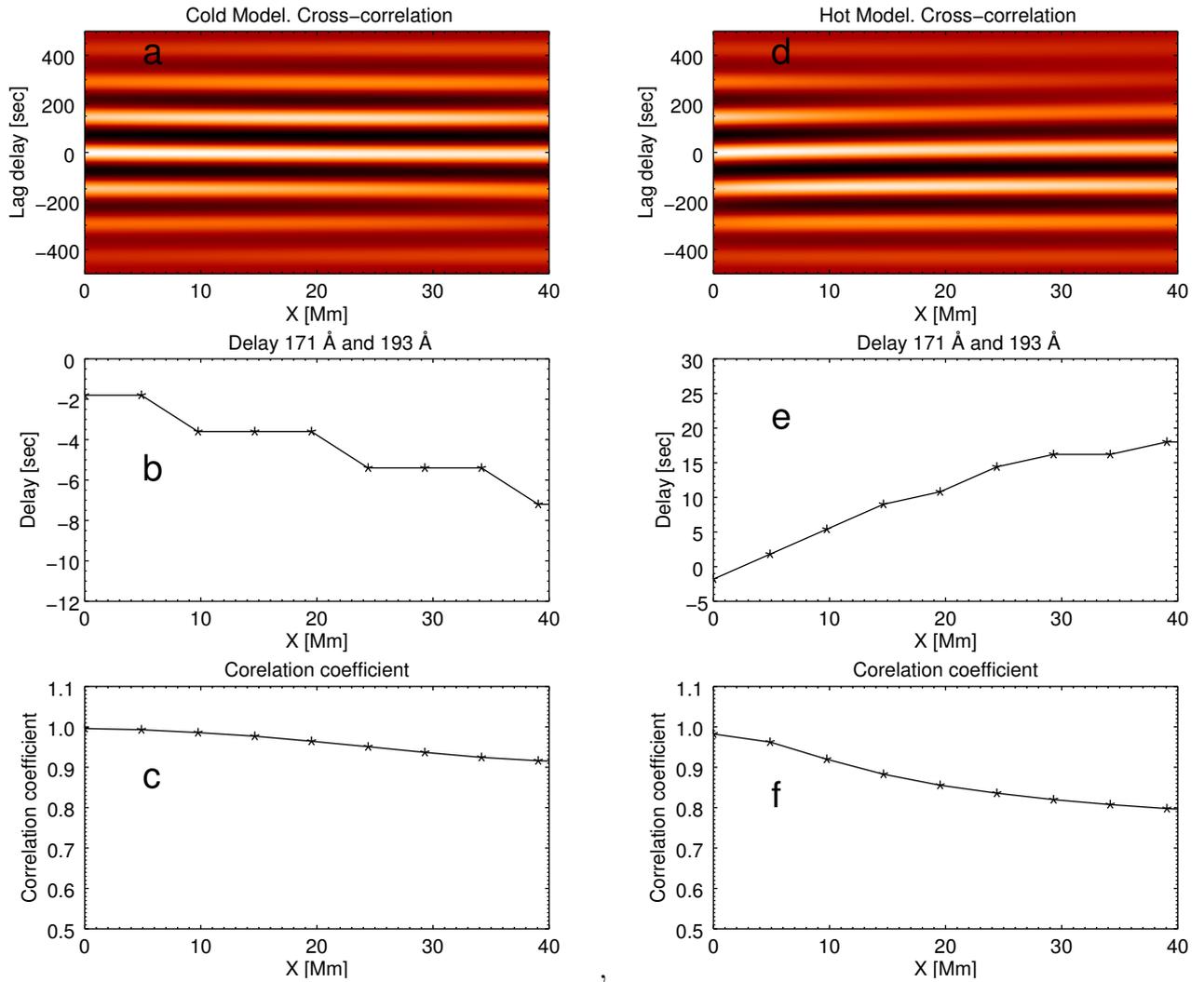


Рис. 3.5. График кросс-корреляции (панель а), задержка между колебаниями распространяющимися от излучающего слоя на длине волны 171 \AA к 193 \AA (панель б), коэффициент корреляции (панель с) для модели с холодным центром и кросс-корреляция (панель d), задержка (панель е) и коэффициент корреляции (панель f) для модели с горячим центром.

ное значение функции кросс-корреляции и соответствующую задержку от положения этого максимума. На рис. 3.5 представлены результаты анализа двух моделей: с холодным и с горячим центром.

Функция кросс-корреляции, вычисленная для синтетических изображений, имеет четкую периодическую структуру, которая видна как горизонтальные полосы на панелях *a* и *d* на рис. 3.5. Коэффициенты корреляции (панели *c* и *f*) немного ниже единицы и имеют похожие графики для холодной и для горячей моделей. Однако, задержки, рассчитанные по положению максимума функции

кросс-корреляции, значительно отличаются для рассмотренных моделей. 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. 3.5 панели *b* и *e*). Эта зависимость является отличительным признаком при определении поперечного распределения температуры в корональных структурах. Далее, мы применяем этот же анализ к реальным наблюдениям SDO/AIA распространения 3-мин колебаний в корональных структурах, чтобы сравнить задержки и определить температурное распределение.

3.5. Наблюдения и их интерпретация

Для детального анализа мы выбрали две активные области NOAA 11582 (2 октября 2012 года) и NOAA 11711 (6 апреля 2013 года). Более подробно о данных написано в разделе 2.1. Обе активные области имеют корональные структуры, имеющие основание в солнечном пятне и хорошо видны на изображениях в КУФ диапазоне. Так же, в обеих активных областях наблюдаются периодические колебания распространяющиеся вверх вдоль корональных структур. Мы пришли к выводу, что это 3-мин колебания, проникающие в корону в виду МГД волн, так как средний период этих возмущений около 3-мин и они связаны с солнечными пятнами.

Для каждой активной области нами были подготовлены КУФ изображения SDO/AIA с 5:00 до 10:00 UT на длинах волн 171 \AA и 193 \AA . В обоих каналах КУФ диапазона хорошо видно несколько ярких корональных веерообразных структур (см. Рис. 3.6 и 3.7). Колебательная составляющая была выделена из исходного сигнала с помощью полосового фильтра Фурье со сглаженным прямоугольным окном в диапазоне от 2 до 4 минут. Далее, вдоль каждой корональной структуры в каналах 171 \AA и 193 \AA была размещена искусственная щель, вдоль которой были построены пространственно-временные карты (см. Рис. 3.8). За-

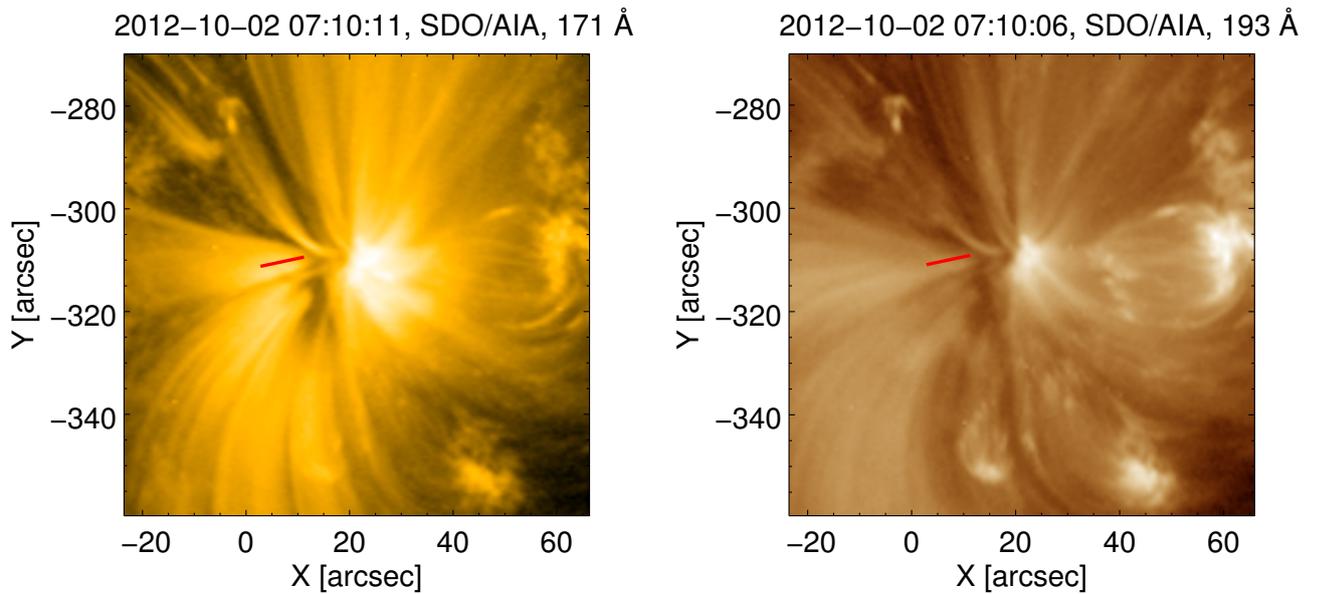


Рис. 3.6. Исследуемая активная область NOAA 11582 (2 Октября 2012). На левой панели изображение активной области зарегистрированное инструментом SDO/AIA на длине волны 171 \AA . На правой панели изображение активной области зарегистрированное на длине волны 193 \AA . Красными линиями, расположенными вдоль корональной структуры, показана искусственная щель.

тем, для каждой точки щели были рассчитаны коэффициент корреляции и задержка распространения волны. Полученные результаты представлены на рис. 3.9. В разделе 3.4 было выявлено, что зависимость задержки от расстояния от основания корональной структуры является отличительной особенностью, которая позволяет выбрать между корональной структурой с холодным и горячим центром.

График задержки, полученный при реальных наблюдениях медленных МГД волн в корональных структурах, качественно совпадает с результатами, полученными в результате МГД моделирования корональной структуры с горячим центром. Согласно проведенному анализу наблюдательных данных обе исследуемые активные области имеют горячий центр и холодную периферию. А именно, обнаружено, что в проанализированных активных областях задержка колебаний между каналами 171 \AA и 193 \AA увеличивается с расстоянием от основания веерной структуры. Эта особенность возникает в основном из-за то-

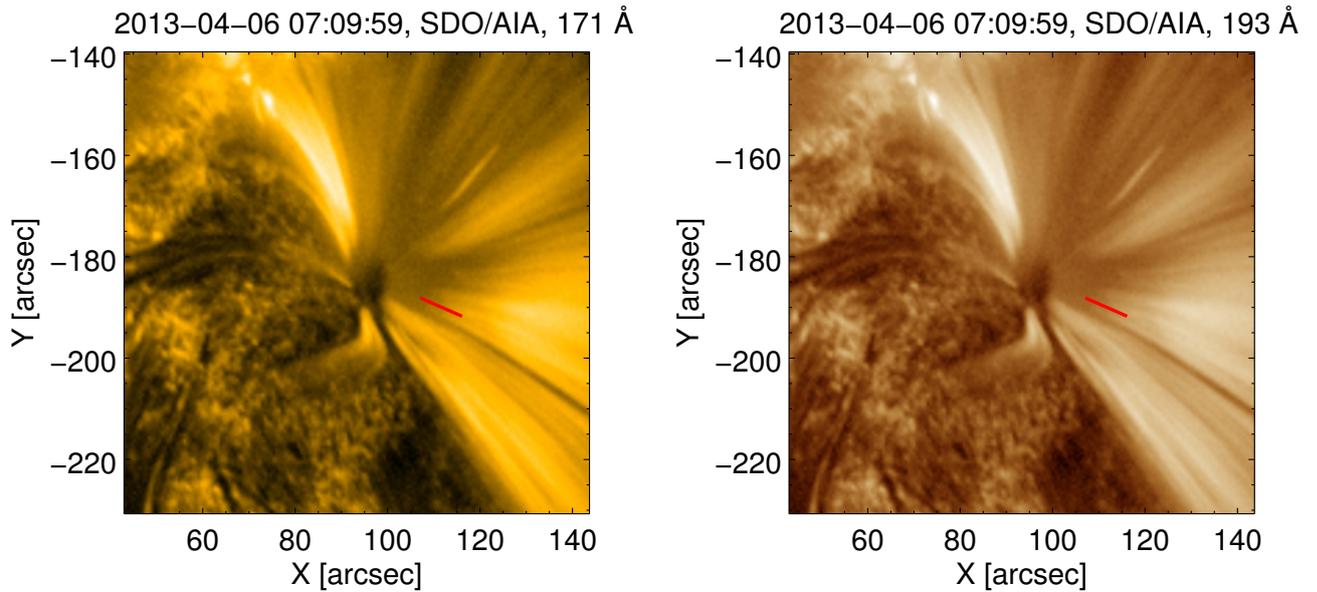


Рис. 3.7. Исследуемая активная область NOAA 11711 (6 апреля 2013). На левой панели изображение активной области зарегистрированное инструментом SDO/AIA на длине волны 171 \AA . На правой панели изображение активной области зарегистрированное на длине волны 193 \AA . Красными линиями, расположенными вдоль корональной структуры, показана искусственная щель.

го, что корональные структуры, которые находятся под разными углами, мы наблюдаем в проекции. Так же этому способствует различие температур (а следовательно и скоростей звука) внутри веерной структуры и на ее периферии, но этот эффект менее значим. Излучение на длине волны 171 \AA исходит в основном от периферийной части корональной структуры, которая находится ближе к наблюдателю из-за ее большей оптической толщины. Это приводит к тому, что путь проходимый волной от основания структуры до пересечения с лучом зрения, длиннее для периферийной части, видимой в канале 171 \AA , чем для внутренней части структуры, видимой в канале 193 \AA . Поэтому, задержка между каналами 171 \AA и 193 \AA получается отрицательной в основании веерной структуры.

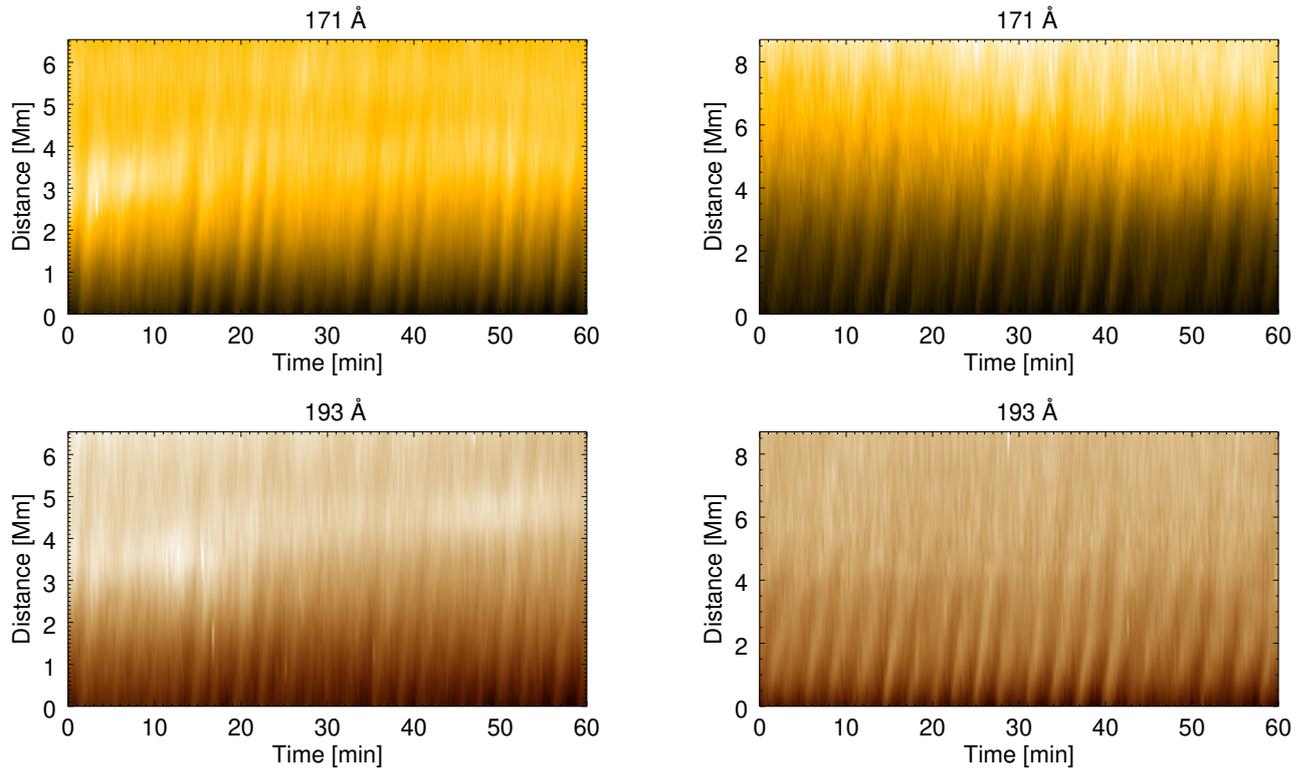


Рис. 3.8. Пространственно-временная карта для одной из исследуемых активных областей: NOAA 11582 (2 Октября 2012) — левый столбик, NOAA 11711 (6 апреля 2013) — правый столбик. На верхних панелях карты построены для изображений, зарегистрированных на длине волны 171 Å. На нижних панелях для изображений, зарегистрированных на длине волны 193 Å.

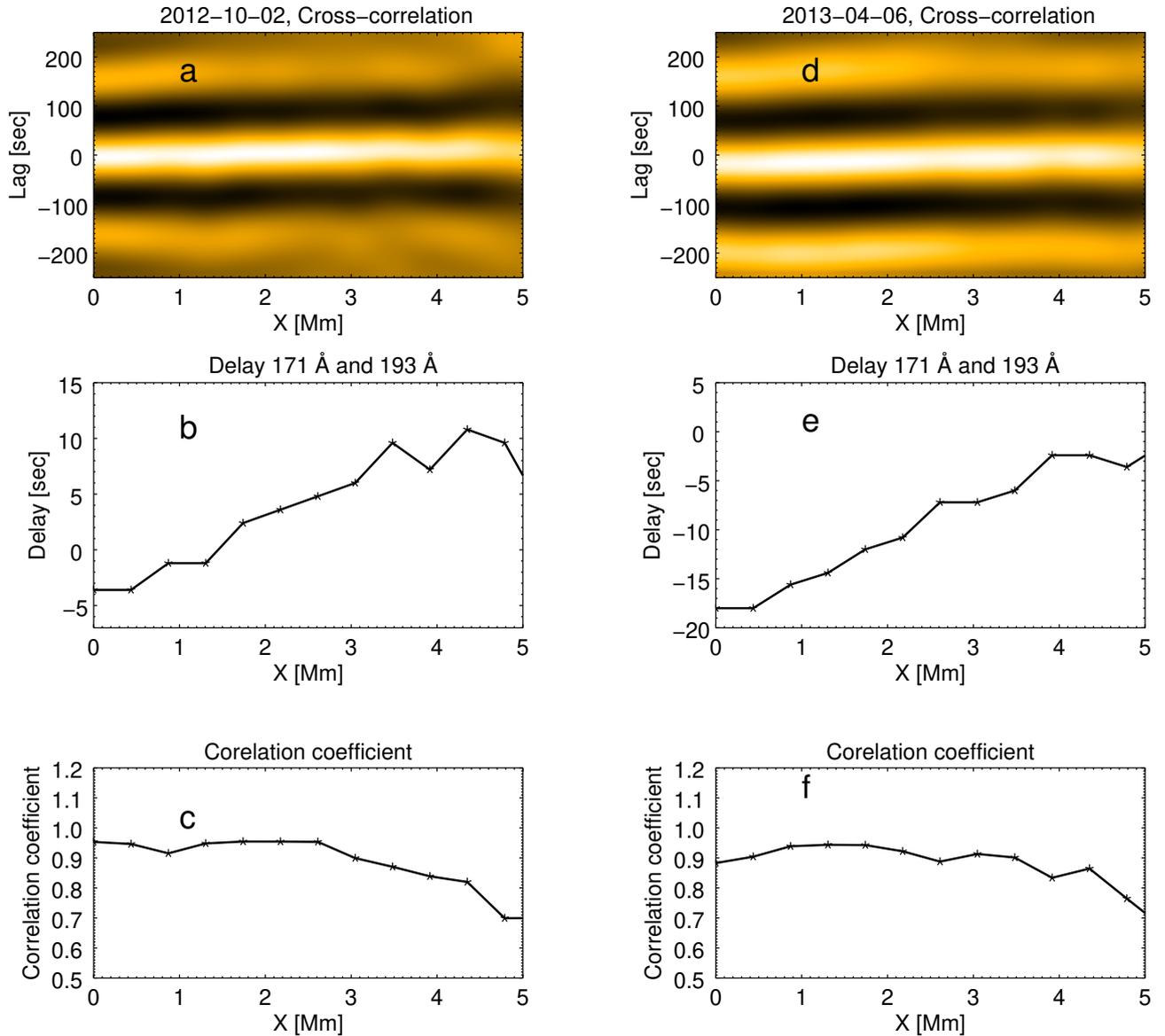


Рис. 3.9. График кросс-корреляции (панель a), задержка между колебаниями распространяющимися от излучающего слоя на длине волны 171 \AA к 193 \AA (панель b), коэффициент корреляции (панель c) и кросс-корреляция (панель d), задержка (панель e) и коэффициент корреляции (панель f) для исследуемых активных областей: NOAA 11582 (2 октября 2012) — левый столбик, NOAA 11711 (6 апреля 2013) — правый столбик.

3.6. Выводы к третьей главе.

Была исследована возможность использования медленных МГД-волн для диагностики поперечного распределения температуры в корональных структурах над солнечным пятном. Для того, что бы установить влияние поперечного распределения температуры на КУФ наблюдения распространения волн в корональных структурах было использовано численное МГД моделирование медленных МГД-волн, распространяющихся в корональных структурах. Моделирование было выполнено с помощью Lage 2D кода [66]. Затем были построены синтетические КУФ изображения с помощью программного кода FoMo¹, реализующего метод прямого моделирования КУФ излучения.

Были созданы две модели веерообразной корональной структуры с двумя распределениями температуры: горячий ядро – холодная периферия и холодное ядро – горячая периферия. Далее мы использовали метод прямого моделирования для создания искусственных изображений, моделирующих наблюдения SDO/AIA на длинах волн 171 \AA и 193 \AA , в виде пространственно-временных диаграмм. Затем была рассчитана функция кросс-корреляции для определения коэффициента корреляции и эффективной фазовой задержки между колебательными сигналами в каналах 171 \AA и 193 \AA .

Задержка между появлением медленной МГД-волны в разных каналах КУФ излучения содержит информацию о поперечном распределении температуры плазмы веерообразной корональной структуре, в которой эта волна распространяется. По результатам моделирования задержка может быть как отрицательной (волна сначала появляется в более горячем канале 193 \AA), так и положительной для обоих корональных структур с холодным и с горячим центром. Было обнаружено, что задержка увеличивается с расстоянием от основания структуры в случае горячего ядра и уменьшается для корональной структуры с холодным ядром. Наш анализ веерообразных структур, наблюда-

¹ <https://wiki.esat.kuleuven.be/FoMo>

емых в активных областях NOAA 11711 и 11582, показал, что наблюдаемая задержка между каналами 171 Å и 193 Å увеличивается с расстоянием от точки основания, что согласуется с моделью с горячим ядром и холодной периферией.

Медленные МГД волны являются хорошим инструментом для диагностики распределения температуры в корональных структурах, так как фазовая скорость зависит от температуры плазмы, где они распространяются. Однако, крайне важно учитывать эффекты, связанные с малой оптической толщиной коронального КУФ излучения и проецированием на картинную плоскость.

Заключение

В рамках настоящей диссертационной получены следующие результаты:

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 силовых 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 вы-

полнена 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.

На защиту вынесены следующие положения:

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 \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. Результаты измерений согласуются с новейшей моделью Фонтенлы и др. для атмосферы тени пятна.

Список литературы

1. Roberts B. Waves in inhomogeneous media. // ESA Special Publication / Ed. by T. Duc Guyenne, James J. Hunt. — Vol. 220. — 1984. — Nov. — P. 137–145.
2. Moore R. L. Dynamic phenomena in the visible layers of sunspots // Space Sci. Rev.. — 1981. — Dec. — Vol. 28. — P. 387–421.
3. Staude J. Solar Research at Potsdam: Papers on the Structure and Dynamics of Sunspots. // Reviews in Modern Astronomy / Ed. by G. Klare. — Vol. 4 of Reviews in Modern Astronomy. — 1991. — P. 69–89.
4. Thomas J. H., Cram L. E., Nye A. H. Five-Minute Oscillations in Sunspots // Bulletin of the American Astronomical Society. — Vol. 13 of BAAS. — 1981. — Mar. — P. 858.
5. Thomas J. H. Oscillations in sunspots // Australian Journal of Physics. — 1985. — Vol. 38. — P. 811–824.
6. Chitre S. M. Theory of umbral oscillations and penumbral waves // NATO Advanced Science Institutes (ASI) Series C / Ed. by J. H. Thomas, N. O. Weiss. — Vol. 375 of NATO Advanced Science Institutes (ASI) Series C. — 1992. — P. 333–343.
7. Bogdan T. J. Sunspot Oscillations: A Review - (Invited Review) // Sol. Phys.. — 2000. — Mar. — Vol. 192. — P. 373–394.
8. Sych R. MHD Wave in Sunspots // Washington DC American Geophysical Union Geophysical Monograph Series. — 2016. — Feb. — Vol. 216. — P. 467–487. — 1509.06466.
9. Nakariakov V. M. Coronal waves and oscillations // Solar Activity and its Magnetic Origin / Ed. by V. Bothmer, A. A. Hady. — Vol. 233 of IAU Symposium. — 2006. — P. 464–471.
10. De Moortel I., Nakariakov V. M. Magnetohydrodynamic waves and coronal seismology: an overview of recent results // Philosophical Transactions of the

- Royal Society of London Series A. — 2012. — Jul. — Vol. 370. — P. 3193–3216. — 1202.1944.
11. Bogdan T. J., Judge P. G. Observational aspects of sunspot oscillations // Royal Society of London Philosophical Transactions Series A. — 2006. — Feb. — Vol. 364. — P. 313–331.
 12. Zhugzhda Y. D. Seismology of a Sunspot Atmosphere // Sol. Phys.. — 2008. — Sep. — Vol. 251. — P. 501–514.
 13. Preface to Topical Issue: Waves in the Solar Corona: From Microphysics to Macrophysics / V. M. Nakariakov, D. J. Pascoe, R. Sych, L. van Driel-Gesztelyi // Sol. Phys.. — 2016. — Nov. — Vol. 291, no. 11. — P. 3139–3142.
 14. Beckers J. M., Tallant P. E. Chromospheric Inhomogeneities in Sunspot Umbrae // Sol. Phys.. — 1969. — Jun. — Vol. 7. — P. 351–365.
 15. Giovanelli R. G. Oscillations and Waves in a Sunspot // Sol. Phys.. — 1972. — Nov. — Vol. 27. — P. 71–79.
 16. Giovanelli R. G., Harvey J. W., Livingston W. C. Motions in solar magnetic tubes. III - Outward wave propagation in sunspot umbras // Sol. Phys.. — 1978. — Jul. — Vol. 58. — P. 347–361.
 17. Uexkuell M. V., Kneer F., Mattig W. The chromosphere above sunspot umbrae. IV - Frequency analysis of umbral oscillations // A&A. — 1983. — Jul. — Vol. 123. — P. 263–270.
 18. Lites B. W., Thomas J. H. Sunspot umbral oscillations in the photosphere and low chromosphere // ApJ. — 1985. — Jul. — Vol. 294. — P. 682–688.
 19. Khomenko E. Simulations of Waves in Sunspots // Solar-Stellar Dynamos as Revealed by Helio- and Asteroseismology: GONG 2008/SOHO 21 / Ed. by M. Dikpati, T. Arentoft, I. González Hernández et al. — Vol. 416 of Astronomical Society of the Pacific Conference Series. — 2009. — Dec. — P. 31. — 0812.0040.
 20. Zhugzhda Y. D., Locans V. Resonance Oscillations in Sunspots // Soviet Astronomy Letters. — 1981. — Feb. — Vol. 7. — P. 25–27.

21. 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.
22. Zhugzhda Y., Sych R. Local sunspot oscillations and umbral dots // *Research in Astronomy and Astrophysics*. — 2018. — Aug. — Vol. 18, no. 9. — P. 105. — 1804.03874.
23. Chromospheric Resonances above Sunspot Umbrae / G. J. J. Botha, T. D. Arber, V. M. Nakariakov, Y. D. Zhugzhda // *ApJ*. — 2011. — Feb. — Vol. 728. — P. 84.
24. Oscillations Above Sunspots / N. Brynildsen, P. Maltby, T. Fredvik, O. Kjeldseth-Moe // *Sol. Phys.*. — 2002. — Jun. — Vol. 207. — P. 259–290.
25. On the nature of the 3 minute oscillations above sunspots / V. H. Hansteen, Ø. Wikstøl, N. Brynildsen et al. // *SOLMAG 2002. Proceedings of the Magnetic Coupling of the Solar Atmosphere Euroconference* / Ed. by Huguette Sawaya-Lacoste. — Vol. 505 of ESA Special Publication. — 2002. — Oct. — P. 183–186.
26. Afanasyev A. N., Nakariakov V. M. Cut-off period for slow magnetoacoustic waves in coronal plasma structures // *A&A*. — 2015. — Oct. — Vol. 582. — P. A57.
27. Sigwarth M., Mattig W. Velocity and intensity oscillations in sunspot penumbrae. // *A&A*. — 1997. — Aug. — Vol. 324. — P. 743–749.
28. Nakariakov V. M., Verwichte E. Coronal seismology: Seismology of the corona of the Sun // *Astronomy and Geophysics*. — 2004. — Aug. — Vol. 45, no. 4. — P. 4.26–4.27.
29. Behaviour of oscillations in loop structures above active regions / D. Y. Kolobov, N. I. Kobanov, A. A. Chelpanov et al. // *Advances in Space Research*. — 2015. — Dec. — Vol. 56. — P. 2760–2768. — 1505.02857.
30. Bloomfield D. S., Lagg A., Solanki S. K. The Nature of Running Penumbrae

- Waves Revealed // *ApJ*. — 2007. — Dec. — Vol. 671. — P. 1005–1012. — 0709.3731.
31. Oscillations in the wings of sunspot transition region lines / N. Brynildsen, P. Maltby, O. Kjeldseth-Moe, K. Wilhelm // *A&A*. — 2003. — Feb. — Vol. 398. — P. L15–L18.
 32. Sunspot oscillations in the chromosphere, transition region, and corona / N. Brynildsen, P. Maltby, T. Fredvik, O. Kjeldseth-Moe // *Solar Variability: From Core to Outer Frontiers* / Ed. by A. Wilson. — Vol. 2 of ESA Special Publication. — 2002. — Dec. — P. 513–516.
 33. O’Shea E., Muglach K., Fleck B. Oscillations above sunspots: Evidence for propagating waves? // *A&A*. — 2002. — May. — Vol. 387. — P. 642–664.
 34. Centeno R., Collados M., Trujillo Bueno J. Spectropolarimetric Investigation of the Propagation of Magnetoacoustic Waves and Shock Formation in Sunspot Atmospheres // *ApJ*. — 2006. — Apr. — Vol. 640. — P. 1153–1162. — astro-ph/0512096.
 35. Kobanov N. I., Chelpanov A. A., Kolobov D. Y. Oscillations above sunspots from the temperature minimum to the corona // *A&A*. — 2013. — Jun. — Vol. 554. — P. A146. — 1305.4718.
 36. Multi-layer Study of Wave Propagation in Sunspots / T. Felipe, E. Khomenko, M. Collados, C. Beck // *ApJ*. — 2010. — Oct. — Vol. 722. — P. 131–144. — 1008.4004.
 37. Felipe T., Khomenko E., Collados M. Magnetoacoustic Wave Energy from Numerical Simulations of an Observed Sunspot Umbra // *ApJ*. — 2011. — Jul. — Vol. 735. — P. 65. — 1104.4138.
 38. Multilevel Analysis of Oscillation Motions in Active Regions of the Sun / V. E. Abramov-Maximov, G. B. Gelfreikh, N. I. Kobanov et al. // *Sol. Phys.*. — 2011. — May. — Vol. 270. — P. 175–189. — 1102.1074.
 39. Oscillations in the Umbral Atmosphere / N. Brynildsen, P. Maltby, C. R. Foley et al. // *Sol. Phys.*. — 2004. — Jun. — Vol. 221. — P. 237–260.

40. De Moortel I. Longitudinal Waves in Coronal Loops // *Space Sci. Rev.*. — 2009. — Dec. — Vol. 149. — P. 65–81.
41. The detection of 3 & 5 min period oscillations in coronal loops / I. De Moortel, J. Ireland, A. W. Hood, R. W. Walsh // *A&A.* — 2002. — May. — Vol. 387. — P. L13–L16.
42. De Pontieu B., Erdélyi R., De Moortel I. How to Channel Photospheric Oscillations into the Corona // *ApJ.* — 2005. — May. — Vol. 624, no. 1. — P. L61–L64.
43. Frequency drifts of 3-min oscillations in microwave and EUV emission above sunspots / R. Sych, T. V. Zaqarashvili, V. M. Nakariakov et al. // *A&A.* — 2012. — Mar. — Vol. 539. — P. A23. — 1110.2556.
44. Christopoulou E. B., Georgakilas A. A., Koutchmy S. Oscillations and running waves observed in sunspots // *A&A.* — 2000. — Feb. — Vol. 354. — P. 305–314.
45. Christopoulou E. B., Georgakilas A. A., Koutchmy S. Oscillations and running waves observed in sunspots. III. Multilayer study // *A&A.* — 2001. — Aug. — Vol. 375. — P. 617–628.
46. Wavelet Analysis of Umbral Oscillations / E. B. Christopoulou, A. Skodras, A. A. Georgakilas, S. Koutchmy // *ApJ.* — 2003. — Jul. — Vol. 591. — P. 416–431.
47. 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.
48. Detection of Periodic Oscillations in Sunspot-Associated Radio Sources / G. B. Gelfreikh, V. Grechnev, T. Kosugi, K. Shibasaki // *Sol. Phys.*. — 1999. — Mar. — Vol. 185. — P. 177–191.
49. Abramov-Maximov V. E., Gelfreikh G. B., Shibasaki K. Quasi-periodic Oscillations of Solar Active Regions in Connection with Their Flare Activity - NoRH Observations // *Sol. Phys.*. — 2011. — Nov. — Vol. 273. — P. 403–

412. — 1107.1620.
50. Long-Period Oscillations of Sunspots by NoRH and SSRT Observations / I. A. Bakunina, V. E. Abramov-maximov, V. M. Nakariakov et al. // PASJ. — 2013. — Dec. — Vol. 65. — P. S13.
51. Shibasaki K. Microwave Detection of Umbral Oscillation in NOAA Active Region 8156: Diagnostics of Temperature Minimum in Sunspot // ApJ. — 2001. — Apr. — Vol. 550. — P. 1113–1118.
52. Relationship between wave processes in sunspots and quasi-periodic pulsations in active region flares / R. Sych, V. M. Nakariakov, M. Karlicky, S. Anfinogentov // A&A. — 2009. — Oct. — Vol. 505. — P. 791–799. — 1005.3594.
53. Solanki S. K. Sunspots: An overview // A&A Rev.. — 2003. — Vol. 11. — P. 153–286.
54. Thomas J. H., Weiss N. O. Sunspots and Starspots. — Cambridge University Press, 2008. — Oct.
55. 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.
56. 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.
57. 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.
58. Lites B. W., Skumanich A. A model of a sunspot chromosphere based on OSO 8 observations // ApJS. — 1982. — Jun. — Vol. 49. — P. 293–315.
59. Anfinogentov S., Nakariakov V. M. Motion Magnification in Coronal Seismology // Sol. Phys.. — 2016. — Nov. — Vol. 291. — P. 3251–3267. — 1611.01790.

60. 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.
61. 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.
62. Deres A., Anfinogentov S. Probing the Sunspot Atmosphere with Three-Minute Oscillations // *Sol. Phys.*. — 2018. — Jan. — Vol. 293, no. 1. — P. 2. — 1710.11552.
63. 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.
64. 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.
65. 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.
66. 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.
67. Marsh M. S., Walsh R. W. p-Mode Propagation through the Transition Region into the Solar Corona. I. Observations // *ApJ*. — 2006. — May. — Vol. 643. — P. 540–548.
68. McIntosh S. W., Jefferies S. M. Observing the Modification of the Acoustic Cutoff Frequency by Field Inclination Angle // *ApJ*. — 2006. — Aug. — Vol.

647. — P. L77–L81.
69. Bel N., Leroy B. Analytical Study of Magnetoacoustic Gravity Waves // *A&A*. — 1977. — Mar. — Vol. 55. — P. 239.
70. Ю. Д. Жугжда и Р. А. Сыч. Модель локальных колебаний в солнечных пятнах // *Письма в Астрон. журн.* — 2014. — Т. 40, № 9. — С. 638–656.
71. Propagating Disturbances in Coronal Loops: A Detailed Analysis of Propagation Speeds / G. Kiddie, I. De Moortel, G. Del Zanna et al. // *Sol. Phys.*. — 2012. — Aug. — Vol. 279. — P. 427–452. — 1205.0891.
72. The Source of 3 Minute Magnetoacoustic Oscillations in Coronal Fans / D. B. Jess, I. De Moortel, M. Mathioudakis et al. // *ApJ*. — 2012. — Oct. — Vol. 757. — P. 160. — 1208.3194.
73. Marsh M. S., Walsh R. W., Plunkett S. Three-dimensional Coronal Slow Modes: Toward Three-dimensional Seismology // *ApJ*. — 2009. — Jun. — Vol. 697. — P. 1674–1680. — 0903.4039.
74. The Atmospheric Imaging Assembly on the Solar Dynamics Observatory / A. M. Title, J. T. Hoeksema, C. J. Schrijver, Aia Team // 36th COSPAR Scientific Assembly. — Vol. 36 of COSPAR Meeting. — 2006.
75. Wheatland M. S., Sturrock P. A., Roumeliotis G. An Optimization Approach to Reconstructing Force-free Fields // *ApJ*. — 2000. — Sep. — Vol. 540, no. 2. — P. 1150–1155.
76. Rudenko G. V., Myshyakov I. I. Analysis of Reconstruction Methods for Non-linear Force-Free Fields // *Sol. Phys.*. — 2009. — Jul. — Vol. 257. — P. 287–304.
77. The altitude structure of the coronal magnetic field of AR 10933 / T. I. Kaltman, V. M. Bogod, A. G. Stupishin, L. V. Yasnov // *Astronomy Reports*. — 2012. — Oct. — Vol. 56. — P. 790–799.
78. Modeling of Solar Atmosphere Parameters Above Sunspots Using RATAN-600 Microwave Observations / A. G. Stupishin, T. I. Kaltman, V. M. Bogod, L. V. Yasnov // *Sol. Phys.*. — 2018. — Jan. — Vol. 293. — P. 13.

79. Forward modelling of optically thin coronal plasma with the FoMo tool /
T. Van Doorselaere, P. Antolin, D. Yuan et al. // *Frontiers in Astronomy
and Space Sciences*. — 2016. — Feb. — Vol. 3. — P. 4.
80. Antolin P., Van Doorselaere T. Line-of-sight geometrical and instrumental
resolution effects on intensity perturbations by sausage modes // *A&A*. —
2013. — Jul. — Vol. 555. — P. A74. — 1303.6147.
81. Reznikova V. E., Antolin P., Van Doorselaere T. Forward Modeling of Gy-
rosynchrotron Intensity Perturbations by Sausage Modes // *ApJ*. — 2014. —
Apr. — Vol. 785. — P. 86.
82. Reznikova V. E., Van Doorselaere T., Kuznetsov A. A. Perturbations of
gyrosynchrotron emission polarization from solar flares by sausage modes:
forward modeling // *A&A*. — 2015. — Mar. — Vol. 575. — P. A47.
83. Kuznetsov A. A., Van Doorselaere T., Reznikova V. E. Simulations of Gy-
rosynchrotron Microwave Emission from an Oscillating 3D Magnetic Loop //
Sol. Phys.. — 2015. — Apr. — Vol. 290. — P. 1173–1194. — 1502.06716.
84. De Moortel I., Antolin P., Van Doorselaere T. Observational Signatures of
Waves and Flows in the Solar Corona // *Sol. Phys.*. — 2015. — Feb. — Vol.
290. — P. 399–421. — 1510.01030.
85. Forward Modeling of Standing Slow Modes in Flaring Coronal Loops /
D. Yuan, T. Van Doorselaere, D. Banerjee, P. Antolin // *ApJ*. — 2015. —
Jul. — Vol. 807. — P. 98. — 1504.07475.
86. Antolin P., Yokoyama T., Van Doorselaere T. Fine Strand-like Structure
in the Solar Corona from Magnetohydrodynamic Transverse Oscillations //
ApJ. — 2014. — Jun. — Vol. 787. — P. L22. — 1405.0076.