

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт солнечно-земной физики
Российской академии наук Сибирского отделения

На правах рукописи
УДК 523.98



Челпанов Андрей Алексеевич

**Связь колебаний в солнечных пятнах и факелах с корональными
петельными структурами**

Специальность 01.03.03 — физика Солнца

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Иркутск — 2014

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

Научный руководитель:

Кобанов Николай Илларионович, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, ведущий научный сотрудник

Официальные оппоненты:

Сотникова Раиса Тимофеевна, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Иркутский государственный университет», доцент

Котов Валерий Александрович, доктор физико-математических наук, Научно-исследовательский институт Крымская астрофизическая обсерватория, ведущий научный сотрудник

Ведущая организация:

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

Защита состоится «24» сентября 2014 г. в «14» часов на заседании диссертационного совета Д 003.034.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте солнечно-земной физики Сибирского Отделения Российской академии наук по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126а, а/я 291, ИСЗФ СО РАН.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института солнечно-земной физики Сибирского Отделения Российской академии наук.

Автореферат разослан «__»_____2014 г.

Ученый секретарь диссертационного совета ,
кандидат физико-математических наук

Поляков В. И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Волны в солнечной атмосфере играют значительную роль в обмене энергией между слоями атмосферы. Еще в конце 40-х годов XX века Шварцшильдом [Schwarzschild, 1948] было высказано предположение, что волны являются вероятной причиной нагрева солнечной короны, являясь преобразователем и переносчиком из нижних слоев механической энергии фотосферной конвекции.

Исторически считается, что, поскольку МГД-волны могут переносить энергию на значительные расстояния, именно они могут играть ключевую роль в нагреве короны, особенно в областях с открытой конфигурацией магнитного поля. Для анализа волн в этом ключе особенный интерес представляют активные образования на поверхности Солнца, такие как пятна и факелы: именно здесь наиболее отчетливо проявляются особенности взаимодействия солнечных магнитных полей с колебаниями и волнами. Самые заметные из таких образований — солнечные пятна — представляют собой удобный объект для изучения: они обладают круговой симметрией, а в их тенях сосредоточены наиболее сильные потоки магнитного поля, наблюдающиеся на поверхности Солнца; в пятнах можно найти как вертикальные поля в центре тени, так и — ближе к краям полутени — наклонные. Факелы же, не обладая такими удобными для исследования свойствами, тем не менее, представляют в этом вопросе значительный интерес, поскольку они в среднем заметно более распространены на диске Солнца, чем пятна, и занимают в десятки раз большие площади; таким образом, факелы могут быть не менее важным, чем пятна, элементом системы обмена энергией между слоями атмосферы.

Над пятнами и факелами лежат основания корональных петель — структур, образованных магнитным полем и отличающихся повышенной интенсивностью излучения в крайнем ультрафиолете. Часто они наблюдаются в виде веерных структур, представляющих собой корональные петли, у которых не видно вершин.

Исследования колебаний в активных областях проводятся уже почти полвека, однако, объяснение наблюдаемых свойств волновых процессов в них на сегодняшний день существует только лишь в виде нескольких конкурирующих моделей, ни одна из которых до сих пор не признана как наиболее полно и достоверно описывающая происходящие физические процессы всеми исследователями, работающими в этой области [Bogdan, 2000; Bogdan, Judge, 2006].

Как самый внешний слой Солнца, корона оказывает непосредственное влияние — в том числе, в немаловажной мере посредством МГД-волн — на взаимосвязь между Солнцем и средой, окружающей Землю. Таким образом, изучение короны важно для понимания процессов, влияющих на космическую погоду. Поэтому исследование корональных волн сегодня является неотъемлемой частью физики Солнца, физики космоса,

геофизики и астрофизики. Кроме того, корона является естественной лабораторией для изучения свойств плазмы и физических процессов, происходящих ней.

Волны можно рассматривать не только как ключ к вопросу о переносе энергии в верхние слои атмосферы, но и как естественное средство диагностики среды, в которой существуют и распространяются эти волны. Этот принцип лег в основу молодой и активно развивающейся области науки — корональной сейсмологии, которую иногда называют магнитной сейсмологией из-за того, что в подавляющем количестве случаев предметом её изучения являются МГД-волны [De Moortel, Nakariakov, 2012; Stepanov et al., 2012]. Понятие сейсмологии в общем контексте обозначает удаленную диагностику среды с помощью волн. Впервые методы корональной МГД-сейсмологии были предложены Учидой [Uchida, 1970] для глобальной и Робертсом [Roberts et al., 1984] для локальной сейсмологии. Использование же термина «корональная сейсмология» в исследованиях короны было предложено в 1983 году Робертсом и соавторами, которые работали с радионаблюдениями Солнца [Roberts et al., 1983].

Корональная сейсмология позволяет получить информацию, недоступную традиционным способам наблюдения в силу высокой прозрачности вещества короны, а также высокой температуры в ней — значительное термальное уширение корональных эмиссионных линий не позволяет использовать методы, основанные на эффекте Зеемана или на Допплеровском смещении линий спектра. В частности, нам неизвестно точное значение напряженности магнитного поля в короне. А множество характеристик, играющих ключевые роли в физических процессах, не могут быть измерены даже по порядку величины и обычно извлекаются из теоретических оценок [Nakariakov, Verwichte, 2005].

После своего зарождения в конце девяностых годов прошедшего века и последующего бурного развития, сейчас корональная сейсмология находится в поисках теоретических моделей, которые предполагается построить на более детальном структурировании полученного материала и его расширении с использованием относительно новых космических обсерваторий, таких, как SDO и Hinode.

Цель работы

Конечная цель работы заключается в выявлении колебательных мод в активных областях, присутствие которых в корональных петельных структурах на уровне формирования линии Fe IX 171 Å наиболее выражено.

Эта цель выдвигает ряд конкретных задач:

- получение наблюдательного материала, необходимого для исследования волновых процессов в атмосфере пятен и факелов;
- создание алгоритмов, позволяющих объединение и использование в анализе данных наблюдений активных областей, выполненных одновременно обсерваторией SDO и наземным солнечным телескопом в Саянской солнечной обсерватории; решение вопросов пространственно-временного согласования двух типов данных;

- исследование пространственного распределения колебаний и волн как в плоскости, параллельной поверхности Солнца, над активными областями, так и в вертикальном направлении вдоль нормали к поверхности от нижних слоев до короны;
- установление связи между локализацией выделенных частотных мод и пространственными структурами, существующими в короне. Исследование спектрально-фазовых характеристик волн, распространяющихся вдоль корональных петель и веерных структур, наблюдаемых в эмиссии корональных линий.

Научная новизна

1. Разработан и опробован на примере активных областей метод оценки угла наклона вектора магнитного поля над пятном, основанный на сопоставлении пространственной локализации мощности колебаний выделенных частот для двух уровней высоты.
2. Выявлено значительное различие спектров колебаний интенсивности и лучевой скорости в одних и тех же пространственных площадках факельных областей в нижней атмосфере.
3. Впервые проанализировано пространственное распределение мощности колебаний различных частот в факелах и показано, что на корональном уровне пространственная локализация низких частот лучше всего воспроизводит картину петельных структур.

Научная и практическая значимость

Проведен анализ колебаний в магнитных структурах короны и в лежащих под ними активных областях на основе синхронизированных по времени и пространству двух типов данных: временных серий спектрограмм, полученных на наземном солнечном телескопе, и временных серий изображений, полученных космической солнечной обсерваторией SDO. Созданные и отработанные в ходе работы методы и алгоритмы позволят в дальнейшем осуществлять эффективный параллельный анализ такого рода данных для наиболее полного и всестороннего исследования объектов в атмосфере Солнца с учетом их динамики и трехмерной структуры.

Полученные результаты пополняют наши знания о волновых явлениях в короне над активными областями Солнца, способствуя созданию теоретических численных моделей, наиболее приближенных к реальной картине физических процессов, происходящих в солнечной атмосфере. Выявленные различия между поведением колебаний в пятнах и факелах, а также общие черты, свойственные плазме в этих двух типах объектов, создают возможность для объяснения физических процессов в них, а также способствуют прояснению природы пятен и факелов. Представленный анализ может быть использован для установления физических условий (таких, как, например, угол наклона магнитного поля), которые влияют на спектральный состав и другие

характеристики волн, распространяющихся между различными слоями атмосферы. Измеренные характеристики колебаний вносят вклад в решение теоретических вопросов, касающихся переноса энергии волнами и в понимание роли, которую различные корональные магнитные структуры играют в распределении в пространстве волновых процессов, и позволяют прояснить информацию о формировании и эволюции каналов, по которым волновая энергия распространяется между слоями атмосферы Солнца.

Достоверность результатов, представленных в диссертации, обеспечивается использованием достаточно широкого статистического набора наблюдательных данных как наземной, так и космической обсерваторий, а также применением современных методов обработки и анализа наблюдательного материала. Ряд полученных результатов как качественно, так и количественно согласуется с выводами, сделанными ранее другими авторами, в том числе, полученными на основе использования данных других инструментов. Результаты, полученные в ходе работы и вынесенные на защиту, обсуждались на научных семинарах, публиковались в рецензируемых журналах и докладывались на российских и международных конференциях.

Личный вклад автора

Автор совместно с научным руководителем участвовал в обсуждении и постановке задач. Личный вклад автора диссертации заключается в подготовке и проведении наблюдательных экспериментов на Автоматизированном солнечном телескопе Саянской солнечной обсерватории, предварительном анализе и редукции полученных наблюдательных данных. Автору принадлежит разработка компьютерных программ и алгоритмов, проведение расчетов. Автор принимал равное участие в интерпретации полученных результатов, вошедших в совместные публикации. Автор представлял устные и стендовые доклады на конференциях.

Апробация работы

Основные результаты и выводы, изложенные в диссертации, докладывались и обсуждались на следующих научных мероприятиях:

- 39th COSPAR Scientific Assembly (Майсур, Индия, 14-22 Июля 2012 г.);
- The XI russian-chinese conference on space weather (Иркутск, 3-8 сентября 2012 г.);
- XIII Байкальская школа фундаментальной физики «Физические процессы в космосе и околоземной среде» (Иркутск, сентябрь 2013 г.);
- Всероссийская конференция по солнечно-земной физике, посвящённая 100-летию со дня рождения В.Е.Степанова (Иркутск, сентябрь 2013 г.)
- The 2nd Asian-Pacific Solar Physics Meeting (Ханчжоу, Китай, октябрь 2013 г.)
- На научных семинарах в ИСЗФ СО РАН.

Результаты, полученные в работе над диссертацией использовались в ходе выполнения исследования по теме «Мониторинг и комплексный анализ динамических процессов в солнечной атмосфере на основе комплекса обсерваторий Института солнечно-земной физики СО РАН и Иркутского государственного университета, подготовка научно-педагогических кадров в рамках НОЦ» в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы, соглашение № 8407 от 24.08.2012, проекта «П.16.3.2. Нестационарные и волновые процессы в солнечной атмосфере», рег. номер: 01201281650 и гранта президента РФ МК–497.2012.2, Министерства образования и науки РФ ГК 14.518.11.7047.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Установлено, что пространственное распределение мощности низких частот (1–1,5 мГц) в линии 171 Å наиболее четко (в сравнение с другими частотными интервалами) воспроизводит веерные структуры, наблюдаемые в крайнем ультрафиолете над факелами и солнечными пятнами.
2. Обнаружено, что высокочастотные колебания (5–8 мГц) концентрируются во фрагментах, расположенных преимущественно внутри тени пятна и в центре факельной области на всех уровнях высоты — от хромосферы до короны.
3. Показано, что в спектрах колебаний интенсивности излучения для пятен и факелов низкие частоты доминируют от глубокой фотосферы до короны (Fe XII, XXIV 193 Å), при этом наибольшая амплитуда колебаний наблюдается в переходной зоне — линия He II 304 Å.

Публикации

Материалы, представленные в диссертации, были опубликованы в 4 печатных работах, из них 3 работы — в журналах, рекомендованных ВАК для публикации результатов диссертаций.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения и списка литературы, состоящего из 123 наименований. Общий объем диссертации составляет 81 страниц, включая 33 рисунков.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** представлена общая характеристика работы, описаны цели работы и решаемые задачи, отражена научная новизна, актуальность и научная значимость темы, дается обзор работ в области колебаний в активных областях и в корональных петлях над ними, и приводятся положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** описываются два инструмента, анализ данных которых приводится в работе: наземный Автоматизированный солнечный телескоп Саянской солнечной обсерватории и космический телескоп SDO. Также описываются методы первичной обработки серий.

Наблюдения на наземном телескопе проводились одновременно в двух линиях: Si I 10827 Å и He I 10830 Å с глубинами формирования 540 км (фотосфера) и 2000 км (хромосфера) соответственно [Centeno et al., 2009].

Из линий SDO были выбраны четыре спектральных полосы. В качестве корональных использовались спектральные полосы, содержащие линии Fe IX 171 Å и Fe XII, XXIV 193 Å. Другие две — континуум 1700 Å (верхняя фотосфера) и He II 304 Å (хромосфера и переходная область), чьи высоты формирования наиболее близки к высотам формирования линий Si I 10827 Å и He I 10830 Å, используемым в наземных наблюдениях. Кроме того, данные о лучевой скорости и магнитном поле доступны в линии Fe I 6173 Å, формирующейся на высоте 200 км [Parnell, Beckers, 1969].

На языке IDL (Interactive Data Language) был написан ряд программ, позволяющих получить серии изображений активных областей, компенсированные за вращение Солнца. Фурье-спектры, использующиеся для интерпретации временных рядов, получены с помощью функции FFT пакета IDL, использующей алгоритм быстрого Фурье-преобразования. Для отслеживания распространения волн использовалась фильтрация временных сигналов в узкой полосе частот с использованием вэйвлета Морле [Torrence, Compo, 1998].

Во **второй главе** приводится анализ колебаний в атмосфере над пятнами. Рассмотрены пространственные распределения мощности колебаний в двух пятнах и их ближайших окрестностях (Рисунки 1, 2, 3), которые показали, что пятиминутные колебания преимущественно сосредоточены в кольцеобразных структурах, а размеры колец увеличиваются при увеличении высоты формирования линии. Похожая картина наблюдается и на одномерных распределениях вдоль щели наземного телескопа.

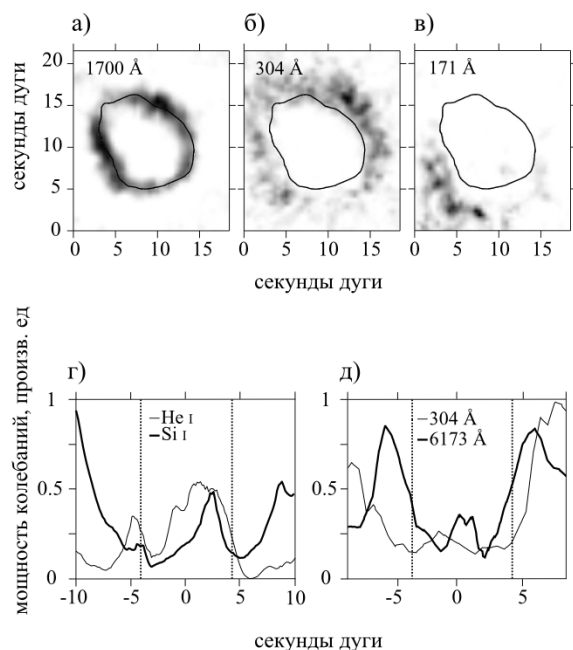


Рисунок 1. Пространственное распределение мощности пятиминутных колебаний для пятна в АО 11479 а) в полосе 1700 \AA ; б) в линии 304 \AA ; в) в линии 171 \AA ; г) вдоль щели наземного телескопа (Si I 10827 \AA и He I 10830 \AA); д) вдоль щели в сигналах линий 304 \AA и 6173 \AA .

Основная мощность колебаний высоких частот (5–8 мГц) (Рисунок 2) сосредоточена в пределах границы тени пятна на фотосферном и хромосферном уровнях.

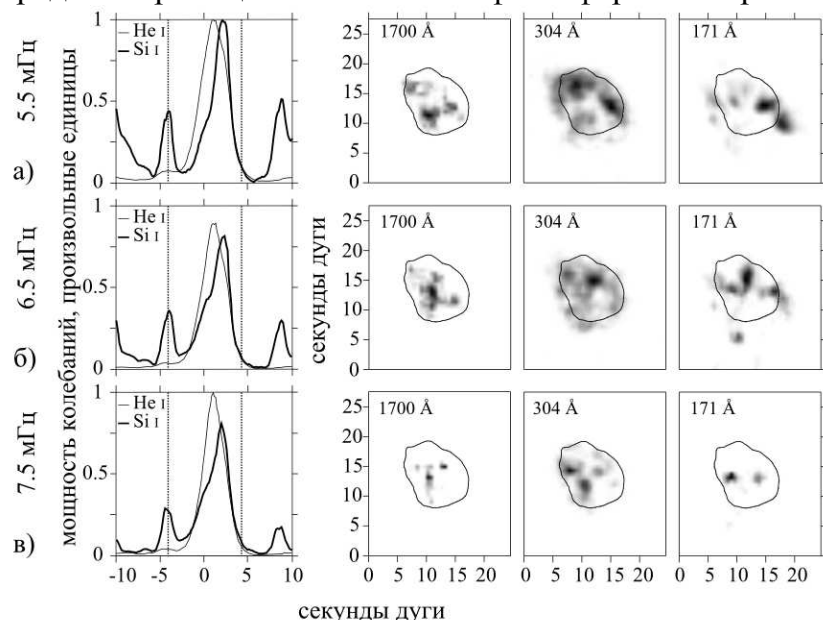


Рисунок 2. Распределение мощности колебаний для частот а) 5,5 мГц; б) 6,5 мГц; в) 7,5 мГц. Первая колонка — распределение мощности вдоль щели телескопа для линий Si I и He I.

Область колебаний расширяется на уровне 304 \AA (переходная зона) по сравнению с уровнем 1700 \AA (верхняя фотосфера). При этом не появляется признаков кольцевой структуры; с высотой становится более заметным размещение мощности колебаний в пространственных фрагментах, количество и площадь которых снижается при переходе

к более высоким частотам. Это позволяет сделать вывод о том, что колебания с высокими частотами концентрируются в неких точках тени ограниченного размера. Согласно [Jess et al., 2012], эти точки — хромосферные теневые точки с повышенной мощностью колебаний.

На распределении низких частот (Рисунок 3) 15-ти минутные колебания сосредоточены во внешней полутени на уровне верхней фотосферы (1700 \AA), формируя кольцо. Как и в случае пятиминутных колебаний, это кольцо расширяется с переходом на более высокий уровень — переходную область (304 \AA). На этом уровне становятся видны узкие элементы, направленные от центра пятна наружу — первые проявления веерных структур. Распределение низких частот на уровне нижней короны схоже с картиной корональных петель в эмиссии линии 171 \AA (четвертая панель). Это свидетельствует о том, что низкочастотные колебания (с периодами 10–15 минут) распространяются вверх из внешней полутени и достигают уровня короны.

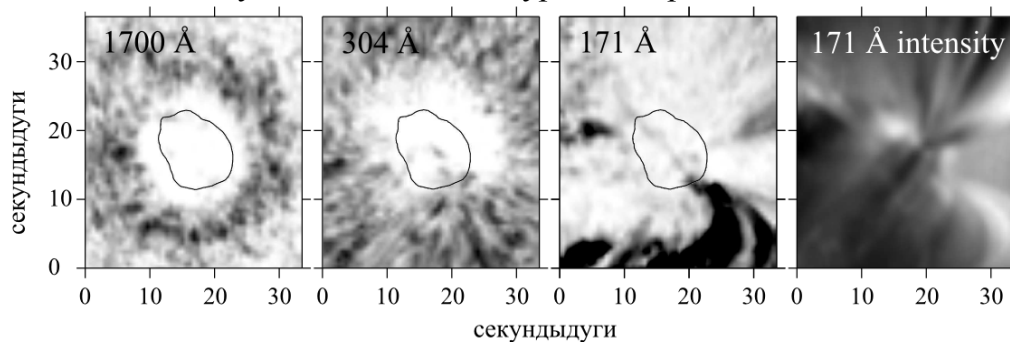


Рисунок 3. Распределения колебаний в полосе 1–2 мГц. Левые три панели: распределения мощности колебаний в спектральных линиях 1700 \AA , 304 \AA и 171 \AA . Четвертая панель: изображения области пятна в интенсивности линии 171 \AA .

Исходя из предположения, что исследуемые колебания являются проявлениями магнитогидродинамических волн, распространяющихся строго вдоль силовых линий магнитного поля, автором был предложен способ косвенно измерить наклон силовых линий магнитного поля, выходящих в атмосферу из границы тени и полутени пятна. Метод заключается в отслеживании смещения колебаний от центра пятна при переходе от слоя к слою. При этом учитывается не только увеличение радиуса кольца, в котором сосредоточены пятиминутные колебания, но и коэффициент корреляции фильтрованных колебаний для уточнения пути распространения волн (Рисунок 4). Полученные значения горизонтального смещения в совокупности с оценками разности высот формирования линий позволяют получить угол наклона траектории распространения волн.

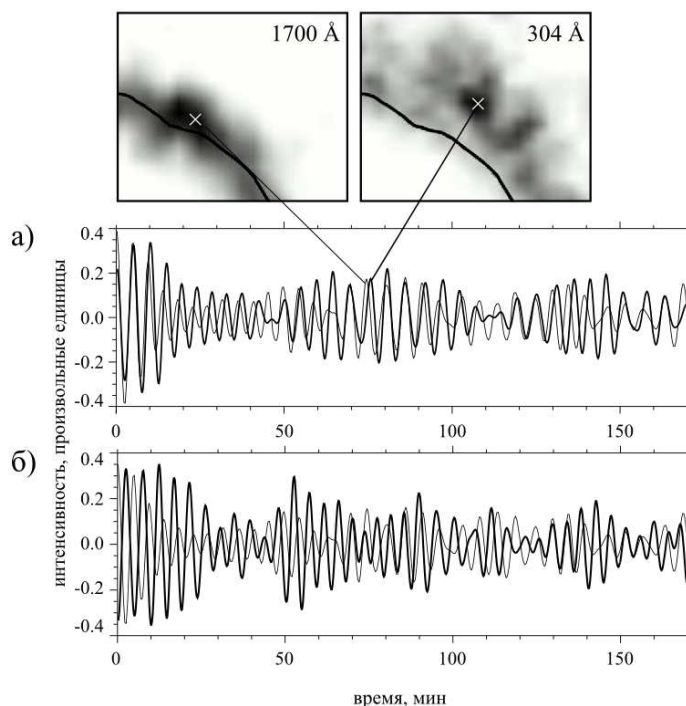


Рисунок 4. Фильтрованные пятиминутные сигналы уровней 1700 Å (тонкие линии) и 304 Å (толстые). а) Точки на различных уровнях были выбраны с учетом наклона траектории распространения волн таким образом, что цуги фильтрованных колебаний показывают максимальный коэффициент корреляции (0,72); б) сигналы от точек, расположенных друг над другом на луче зрения в точке, отмеченной на распределении в полосе 1700 Å показывают меньшее соответствие (коэффициент 0,35).

Полученные результаты дают наклон линий магнитного поля к вертикали 55° – 55° и 55° – 60° для пар 1700 Å–304 Å и 304 Å–171 Å соответственно. Эти величины согласуются с последними результатами [Jess et al., 2012; Reznikova, Shibasaki, 2012].

Для оценки времени фазовой задержки сигналов между высотами и скорости распространения волн использовались фильтрованные по частоте сигналы. Для пятиминутных колебаний был учтен полученный наклон траекторий распространения волн. Для пары линий 1700 Å–304 Å разброс значений фазовой задержки велик: от -20 с до 108 с (отрицательные задержки соответствуют ситуации отставания фотосферного сигнала от хромосферного). Такая особенность наблюдений фазовой задержки наблюдалась и ранее, например, [Reznikova et al., 2012]. Средняя задержка между сигналами линий Si I и He I составляет 47 с; в этой паре линий также наблюдается значительный разброс значений. Задержка в паре линий 304 Å–171 Å варьируется от -12 с до 48 с со средним значением 24 с. Плохое соответствие между цугами сигналов различных слоев атмосферы не обязательно означает, что волны не распространяются вверх. Это может указывать на сосуществование как стоячей, так и распространяющейся волн; получаемый результат зависит от соотношения между амплитудой и фазой этих типов волн. Кроме того, это может значить, что петли магнитного поля, проходящие через нижележащий уровень, либо не достигают вышележащего уровня, возвращаясь в фотосферу, либо на пути вверх отклоняются от луча зрения.

Задержки для колебаний с высокими частотами составили 36–84 с для пары 1700 Å–304 Å и 12–24 с для линий 304 Å–171 Å. Сходство фильтрованных высокочастотных сигналов выше по сравнению с пятиминутными колебаниями (Рисунок 5).

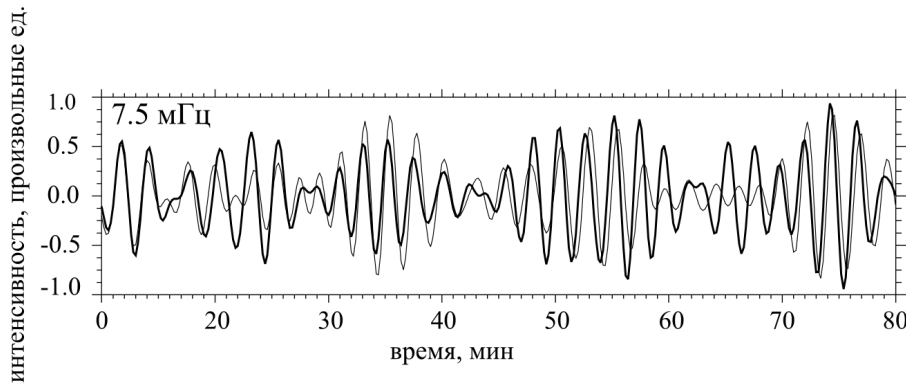


Рисунок 5. Несдвинутые сигналы линий 304 Å (толстая линия) и 171 Å (тонкая линия), фильтрованные в частотной полосе шириной 0,8 мГц с центром на 7,5 мГц.

Скорости распространения волн посчитаны, следуя значениям разностей высот, используемым в статье [Reznikova et al., 2012]: 1700 км между уровнями образования линий 1700 Å и 304 Å, и 1000 км между 304 Å и 171 Å. Для пятиминутных колебаний средние фазовые скорости составляют 24 км/с и 42 км/с для диапазонов фотосфера-хромосфера и хромосфера-корона соответственно. Для частот 5–8 мГц скорости 28 км/с и 55 км/с.

Сравнение колебаний сигналов интенсивности и лучевой скорости показало, что в случае фотосферных линий фазовый сдвиг скорости относительно интенсивности близок к 90° (Рисунок 6, а, б), что в адиабатическом приближении характерно для акустических волн. Фазовая разность для верхней хромосферы менее однозначна и близка к 180° (Рисунок 6, в). На основании измеренных скоростей и фазовых сдвигов предполагается, что наблюдаемые волны — медленные магнитоакустические волны, распространяющиеся вверх вдоль линий магнитного поля.

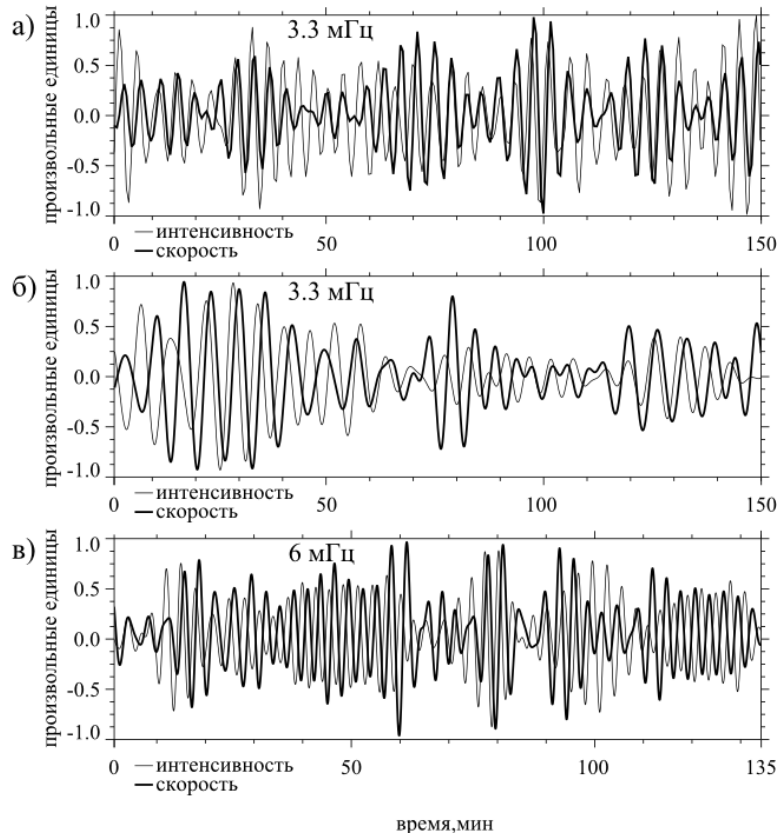


Рисунок 6. Фазовые соотношения между сигналами интенсивности (тонкие линии) и скорости (толстые линии) для линий а) Fe I 6173 Å; б) Si I 10827 Å; в) He I 10830 Å в пятнах.

Третья глава посвящена характеристикам колебаний в атмосфере над факельными областями. Анализ проводился на основе данных по четырем факелам. Как отмечалось ранее [Kobanov, Pulyaev, 2011], в спектрах мощности колебаний лучевых скоростей в фотосферных и хромосферных линиях факелов преобладают пятиминутные колебания (Рисунок 7). Логично было бы предположить, что в случае распространения вверх пятиминутные колебания сохранятся и в более высоких слоях над факелами — в переходной зоне и в короне. Но как в наземных, так и в спутниковых данных не представлено информации, касающейся доплеровской скорости в этих слоях, поэтому дальнейший анализ будет проводиться по сигналам интенсивности.

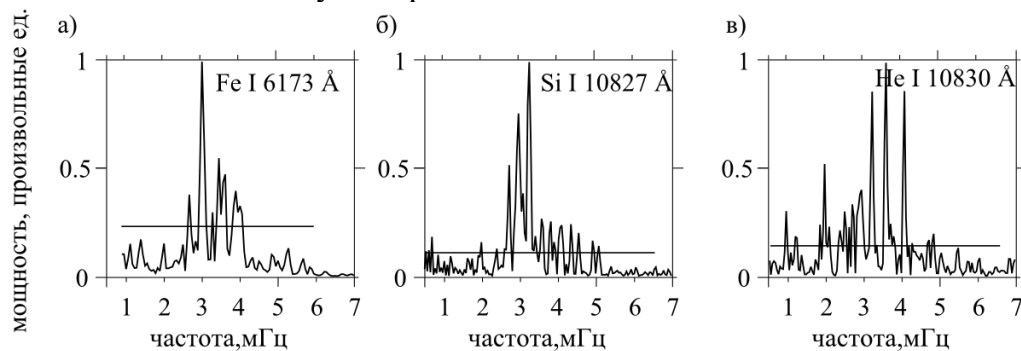


Рисунок 7. Фурье-спектры колебаний лучевой скорости в спектральных линиях а) Fe I 6173 Å, б) Si I 10827 Å и в) He I 10830 Å для одного из факелов.

Поскольку спектры сигналов интенсивности в корональных петлях отличаются от спектров сигналов лучевой скорости нижних слоев атмосферы, для дополнительной проверки были рассчитаны спектры сигналов интенсивности для тех же точек, спектры сигналов скорости в которых показаны на Рисунке 8. В отличие от спектров скорости, в спектрах интенсивности преобладают низкочастотные колебания.

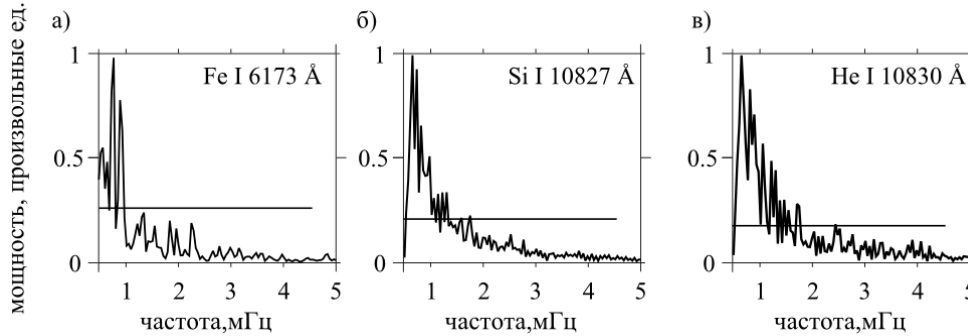


Рисунок 8. Спектры колебаний интенсивности линий нижней атмосферы в факелах: а) Fe I 6173 Å, б) Si I 10827 Å и в) He I 10830 Å.

Можно предположить, что различие спектров сигналов интенсивности и скорости вызвано тем, что низкочастотные колебания не относятся к акустическим колебаниям, а являются проявлением другого типа волн, например, т.н., «сосисочной» моды. Спектры колебаний в линиях наземного телескопа похожи на спектр в линии спутникового телескопа, что говорит о том, что земная атмосфера не вносит кардинальных изменений в спектры колебаний интенсивности, и низкочастотные колебания в этих линиях имеют солнечное происхождение.

В картине излучения линии 171 Å над факелами видны верхние части корональных петель, которые своими основаниями уходят в области с повышенной напряженностью магнитного поля фотосферы. Были получены пространственные распределения мощности колебаний в трех частотных интервалах (Рисунок 9).

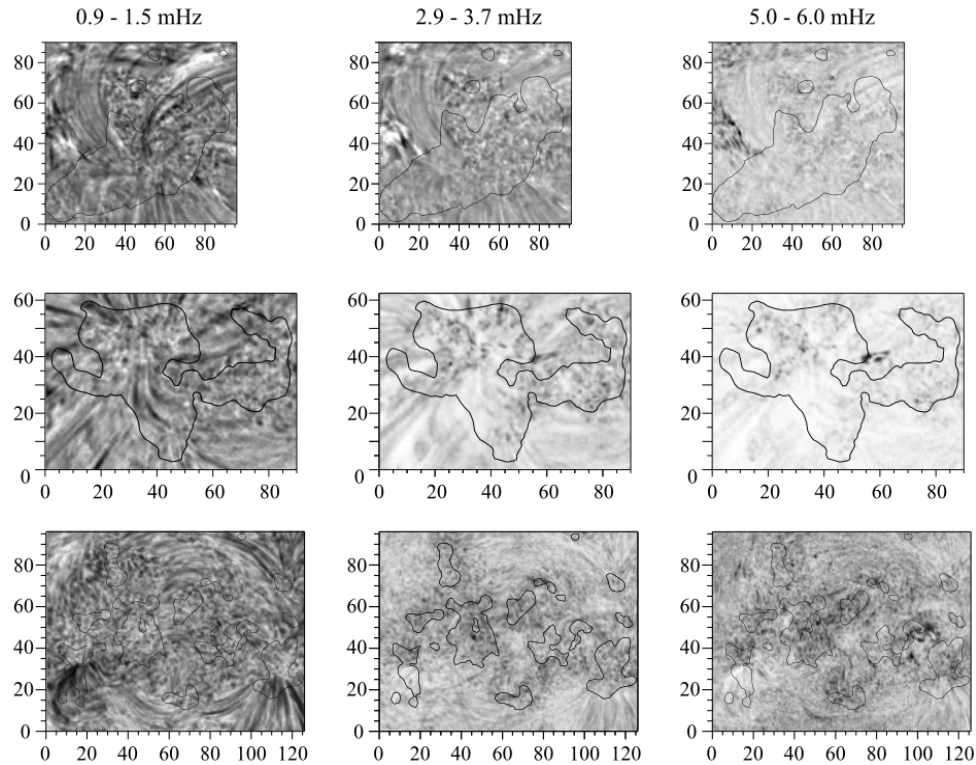


Рисунок 9. Пространственные распределения мощности колебаний интенсивности в корональной линии 171 \AA для различных частот для трех факелов. Сплошными контурами обозначены границы факельных областей, определенные по изображениям в полосе 1700 \AA .

Наиболее близкую картину к изображению корональных петель в линии 171 \AA дают распределения в полосе $0,9\text{--}1,5 \text{ мГц}$: они содержат множество вытянутых фрагментов и наиболее контрастны. В распределении пятиминутных колебаний эти структуры становятся менее контрастными и практически полностью исчезают на картах трехминутных колебаний. Эти распределения, указывают на то, что низкочастотные колебания преобладают в верхних частях корональных петель над факелами.

Для трех диапазонов частот были построены пространственные распределения мощности колебаний в факелах на четырех уровнях высоты (Рисунок 10). В верхней фотосфере (1700 \AA) не видно отличий в низкочастотных колебаниях между факельной областью и близлежащим спокойным Солнцем (верхняя левая панель).

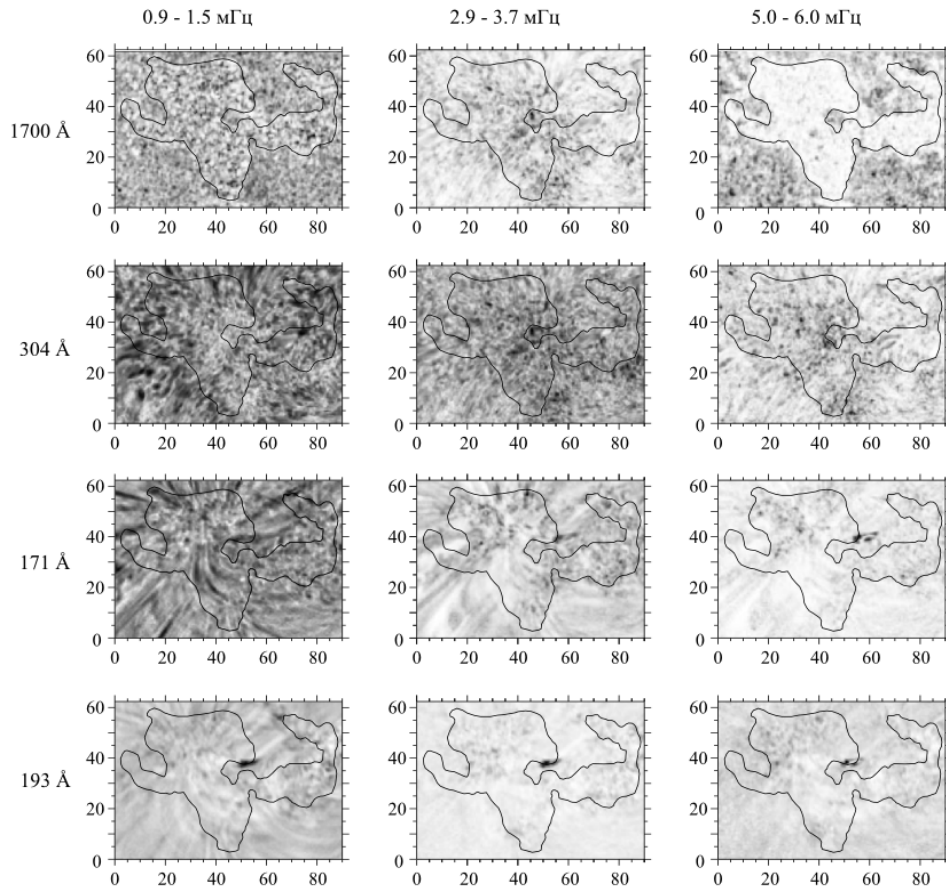


Рисунок 10. Пространственная локализация мощности колебаний в трёх частотных диапазонах на различных высотах для одного из факелов.

В трехминутных колебаниях над факелом мощность заметно ослаблена. В следующем по высоте слое — 304 \AA — мощность колебаний намного повышена во всех частотных диапазонах. На карте низкочастотных колебаний становятся заметными вытянутые структуры. Распределение низких частот для нижней короны заполнено четко проявляющимися петельными структурами. В меньшей степени они заметны в распределениях пятиминутных колебаний. В распределении высоких частот петли выглядят белыми: мощность колебаний в них минимальна.

Распределения мощности колебаний в линии 193 \AA выглядят бледнее, чем в линии 171 \AA . В низких частотах также различимы веерные структуры.

В целях получения более полного представления о характеристиках исследуемых колебаний были оценены глубины модуляции интенсивности в линиях (Рисунок 11). Интенсивность свечения в разных спектральных линиях UV диапазона отличается, поэтому удобнее сравнивать не амплитуды колебаний, а глубину модуляции интенсивности. Для оценки использовался метод, приведенный в работе Резниковой с соавторами [Reznikova et al., 2012].

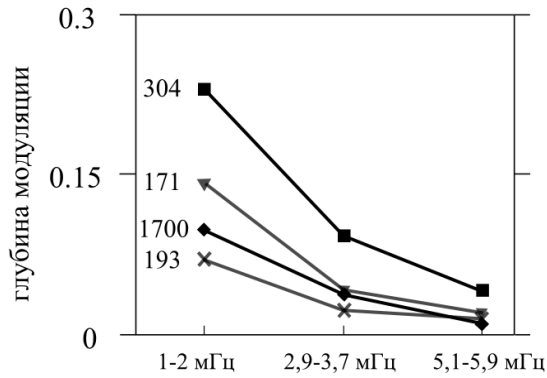


Рисунок 11. Максимальные значения глубины модуляции интенсивности, усредненные по площади факела.

Для всех частот глубина модуляции сигнала 304 Å превосходит глубины модуляции в остальных линиях, а уменьшение мощности сигнала с увеличением частоты характерно для всех линий.

Для исследования распространения волн вдоль петель, для пар точек, располагающихся на петлях рассчитывались спектры колебаний (Рисунок 12).

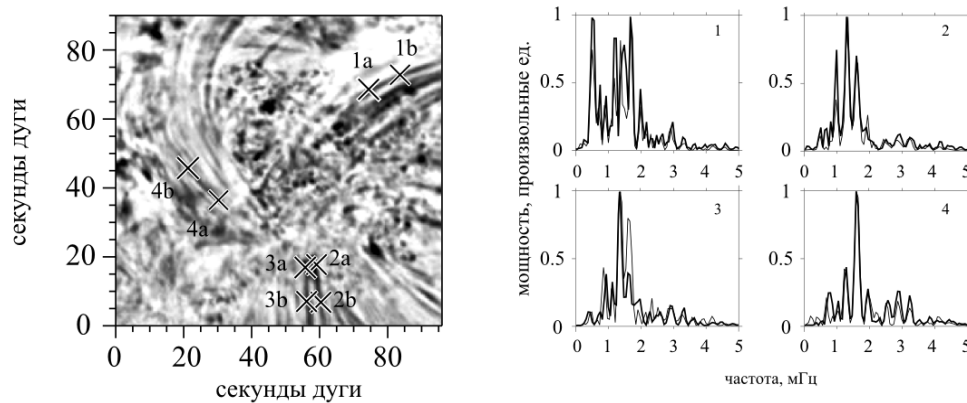


Рисунок 12. Пространственное распределение низкочастотных колебаний (1-2 МГц) в линии Fe IX 171 Å. Крестами отмечены пары точек, расположенных на петлях и используемые для расчета скорости распространения волн вдоль петель. Справа: спектры мощности колебаний интенсивности в петлях над факелом в отмеченных точках. Тонкая линия показывает спектры в точках 1a, 2a, 3a и 4a, жирная — в точках 1b, 2b, 3b и 4b.

Спектры сигналов от пар точек, располагающихся на одной петле похожи друг на друга вплоть до мелких деталей. Такое совпадение характерно именно для точек, через которые проходит корональная петля — спектры точек, находящихся рядом с петлей, не показывают такого сходства: мощность доминирующей частоты вне петли значительно ниже, чем в петле. Совпадение спектров колебаний сигналов в точках на петле дает основание предполагать, что эти колебания — проявления волн, распространяющихся вдоль петли. Для измерения скорости этих волн использовались точки, отмеченные на Рисунке 12, расположенные на расстоянии около десяти секунд дуги друг от друга. Скорость распространения волн в петлях над факелом составила 65 ± 22 км/с, при этом наблюдались как случаи распространения от факела, так и к факелу.

Причина разброса скоростей лежит в непостоянстве измеренных значений фазовой задержки между сигналами пар точек. Такой разброс оказывается неожиданным при

очень высокой степени соответствия друг другу деталей спектров колебаний. Возможное объяснение такого поведения сигнала в том, что на результирующий сигнал интенсивности влияет вещество из нескольких корональных петель, попадающих на луч зрения в каждой точке. Если рассматривать петлю как резонатор продольных колебаний, то спектральный состав этих колебаний в ней в значительной степени будет определяться длиной петли. Можно предполагать, что длины петель, достигающих высот, на уровне которых формируется линия 171 \AA , примерно одинаковы, что дает схожий частотный состав колебаний интенсивности в петлях, при этом фазы сигналов отличаются.

Корона изобилует петлями, соединяющими два таких объекта в одной активной области, а также петлями, базирующиеся основаниями в разных активных областях.

Много исследователей сходятся во мнении, что корональные 5-минутные колебания в основном наблюдаются над факелами и над хромосферной сеткой [De Moortel et al., 2000; De Pontieu et al., 2003; De Pontieu et al., 2005; De Pontieu et al., 2006 Centeno et al., 2006; Vecchio et al., 2007], тогда как трехминутные — в областях, связанными с нижележащими пятнами [O'Shea et al., 2002; Doyle et al., 2003]. Возникает вопрос, меняется ли состав колебаний и фазовая скорость волн на протяжении длины петли, одно из оснований которой находится над пятном, другое — над факелом?

В короне как над факелами и пятнами наибольшую мощность колебаний в излучении имеют низкочастотные колебания — 2 мГц и ниже — и при этом они локализируются в корональных петлях.

Для анализа использовалась активная область NOAA 11311, содержащая пятно и факел. И в факеле, и в пятне располагаются основания множества корональных петель, некоторые из которых соединяют эти два объекта.

Для области, охватывающей пятно и факел, получено распределение мощности колебаний в диапазоне 1–2 мГц (Рисунок 13), и в отдельных точках пространства получены фурье-спектры сигнала в линии 171 \AA .

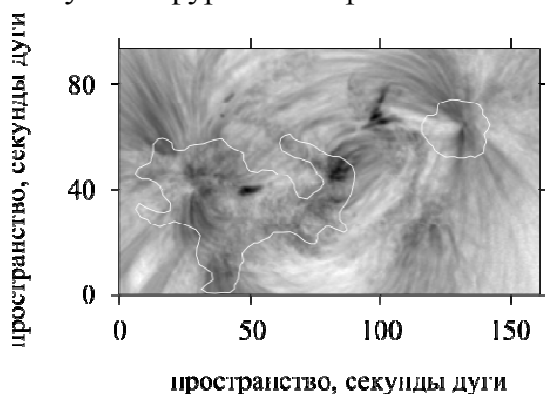


Рисунок 13. Петли в пространственной локализации низкочастотных колебаний в короне над АО 11311. Границы факела и внешней полутени пятна показаны белыми контурами.

Спектры вблизи оснований петель у пятна и у факела отличаются: у большинства спектров в окрестностях пятна максимум мощности приходится на диапазон от 0,5 мГц до 2 мГц, а над факелом он сосредоточен в более узком диапазоне — от 0,5 мГц до 1 мГц, а мощность колебаний в 2–4 раза уступает мощности колебаний над пятнами (Рисунок 14). Авторы статьи [De Moortel et al., 2002] показывают, что колебания в корональных петлях происходят от источника, расположенного под их основанием. В

этом случае можно сделать вывод, что указанные отличия характеристик колебаний в короне порождены отличиями характеристик колебаний в нижних слоях атмосферы.

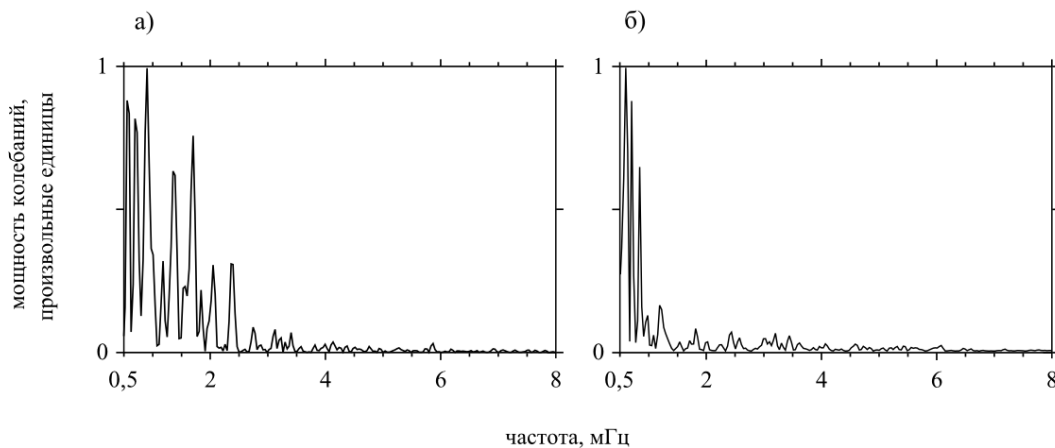


Рисунок 14. Спектры вариаций интенсивности излучения линии 171 \AA в основаниях петель: а) — над пятном; б) — над факелом.

В парах пространственных точек, соответствующих верхним частям петель, сходство спектров не проявляется настолько заметно, как над пятнами и факелами, но, оно также достаточно сильное. Значение скорости распространения у пятна составило $80 \pm 45 \text{ км/с}$ при направлении распространения от пятна. Скорость волн в окрестностях факела меньше — $35 \pm 40 \text{ км/с}$ при этом наблюдается примерно одинаковое число случаев распространения к факелу и от факела.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные при работе над диссертацией:

1. Автором получены высококачественные наблюдательные данные на Автоматизированном Солнечном Телескопе Саянской солнечной обсерватории. Проведена полная обработка исходных данных и выполнен первичный анализ.
2. Произведено согласование синхронизированных по времени серий полученного и отобранного наблюдательного материала наземного телескопа с сериями изображений космической обсерватории SDO.
3. С использованием достаточно обширного наблюдательного материала были проанализированы особенности распределения колебаний разных частот (от 1 МГц до 8 МГц) в факелах и пятнах от глубокой фотосферы до короны.
4. Показано, что в случае пятен, трёхминутные колебания практически полностью сосредоточены в области, очерченной фотосферными границами тени на всех исследуемых уровнях, а пятиминутные — распределены в кольцах, которые с увеличением высоты расширяются от границ тени на уровне фотосферы, приближаясь к внешним границам полутени при переходе к нижней короне. Низкочастотные колебания локализованы в кольцах большего радиуса на нижних уровнях, а на верхних эта кольцевая структура нарушается: карты пространственного распределения мощности колебаний повторяют корональные образования, наблюдаемые в крайнем ультрафиолете ($\text{Fe IX } 171 \text{ \AA}$) — петли и веерные структуры.
5. Предложен метод оценки угла наклона магнитного поля пятен в широком диапазоне высот по косвенным данным с учетом пространственной локализации мощности выделенных частотных мод на разных уровнях высоты. В работе представлены

результаты, полученные с применением этого метода по двум пятнам. Было показано, что при расчете фазовой скорости пятиминутных волн необходимо учитывать отклонение от вертикальной траектории распространения колебаний для получения более достоверных результатов.

6. В короне пространственная локализация низкочастотных колебаний над пятнами и факелами хорошо воспроизводит веерные структуры петель. Это свидетельствует о том, что вершины большинства корональных петель, по которым распространяются колебания с периодами 10–20 минут, лежат в слое формирования линии Fe IX 171 Å, тогда как колебания с периодами 3 и менее минут, возможно, проникают в более высокие слои короны.

7. Фазовые скорости, измеряемые в вершинах корональных петель на уровне формирования линии Fe IX 171 Å, достигают 100–150 км/с для пятен и 50–100 км/с для факелов.

8. Для факельных областей было показано, что в нижних слоях атмосферы в сигналах лучевой скорости преобладают пятиминутные колебания, а в сигналах интенсивности преимущественно наблюдаются низкочастотные колебания — колебания с частотами менее 2 мГц. Для объяснения такого различия спектральных составов было сделано предположение о том, что эти два типа сигналов сформированы двумя разными типами МГД-волн, сосуществующими в одном объеме. Установлено, что доминирование низких частот сохраняется и в вышележащих слоях от хромосферы до короны.

Публикации по теме диссертации

Kobanov N. I., Chelpanov A. A., Kolobov D. Y. Oscillations above sunspots from the temperature minimum to the corona // *Astronomy & Astrophysics*. 2013. Vol. 554. P. 6.

Kobanov N., Kolobov D., Kustov A., Chupin S., Chelpanov A. Direct Measurement Results of the Time Lag of LOS-Velocity Oscillations Between Two Heights in Solar Faculae and Sunspots // *Solar Physics*. 2013. Vol. 284. P. 379–396.

Кобанов Н. И., Челпанов А. А. Связь корональных веерных структур с колебаниями над факельными областями // *Астрономический Журнал*. 2014. Т. 91. С. 1–9.

Челпанов А. А., Кобанов Н. И. Веерные корональные структуры и волновые процессы в солнечной атмосфере // *Сборник трудов БШФФ-2013*. 2013. С. 121–123.

ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Bogdan T. J. Sunspot Oscillations: A Review // *Solar Physics*. 2000. Vol. 192. P. 373–394.

Bogdan T. J., Judge. P. G. Observational aspects of sunspot oscillations // *Royal Society of London Transactions Series A*. 2006. Vol. 364. P. 313–331.

Centeno R., Collados M., Trujillo Bueno J. Oscillations and Wave Propagation in Different Solar Magnetic Features, Solar Polarization 4 // *ASP Conference Series*. 2006. Vol. 358. P. 465.

Centeno R., Collados M., Trujillo Bueno J. Wave Propagation and Shock Formation in Different Magnetic Structures // *The Astrophysical Journal*. 2009. Vol. 692. P. 1211–1220.

De Pontieu B., Carlsson M., Stein R., Rouppe van der Voort L., Löfdahl M., van Noort M., Nordlund Å., Scharmer G. Rapid Temporal Variability of Faculae: High-Resolution Observations and Modeling // *The Astrophysical Journal*. 2006. Vol. 646. P. 1405–1420.

De Pontieu B., Erdélyi R., De Moortel I. How to Channel Photospheric Oscillations into the Corona // *The Astrophysical Journal*. 2005. Vol. 624. P. L61–L64.

De Moortel I., Ireland J., Walsh R.W. Observation of oscillations in coronal loops // *Astronomy & Astrophysics*. 2000. V. 355. P. L23–L26.

De Moortel I., Nakariakov V. M. Magnetohydrodynamic waves and coronal seismology: an overview of recent results // *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2012. Vol. 370. P. 3193–3216.

De Moortel, I.; Ireland, J.; Hood, A. W.; Walsh, R. W., The detection of 3 & 5 min period oscillations in coronal loops // *Astronomy & Astrophysics*. V.387. P.L13-L16.

Doyle J. G., Dzifčáková E., Madjarska M. S. Coronal Oscillations above Sunspots? // *Solar Physics*. 2003. Vol. 218. P. 79–84.

Jess D. B., De Moortel I., Mathioudakis M., Christian D. J., Reardon K. P., Keys P. H., Keenan F. P. The Source of 3 Minute Magnetoacoustic Oscillations in Coronal Fans // *The Astrophysical Journal*. 2012. Vol. 757. P. 160–173.

Kobanov N. I., Pulyaev V. A. Spatial Distribution of Oscillations in Faculae // *Solar Physics*. 2011. Vol. 268. P. 329–334.

Nakariakov V. M., Verwichte E. Coronal Waves and Oscillations // *Living Reviews in Solar Physics*. 2005. Vol. 2. P. 3.

O'Shea E., Muglach K., Fleck B. Oscillations above sunspots: Evidence for propagating waves? // *Astronomy & Astrophysics*. 2002. Vol. 387. P. 642–664.

Parnell R. L., Beckers J. M. The Interpretation of Velocity Filtergrams. I: The Effective Depth of Line Formation // *Solar Physics*. 1969. Vol. 9. P. 35–38.

Reznikova V. E., Shibasaki K. Spatial Structure of Sunspot Oscillations Observed with SDO/AIA // *The Astrophysical Journal*. 2012. Vol. 756. P. 10.

Reznikova V. E., Shibasaki K., Sych R. A., Nakariakov V. M. Three-minute Oscillations above Sunspot Umbra Observed with the Solar Dynamics Observatory/Atmospheric Imaging Assembly and Nobeyama Radioheliograph // *The Astrophysical Journal*. 2012. Vol. 746. P. 10.

Roberts B., Edwin. P. M., Benz A. O. Fast pulsations in the solar corona // *Nature*. 1983. Vol. 305. P. 688–690.

Roberts B., Edwin. P. M., Benz A. O. On coronal oscillations // *Astrophysical Journal*. 1984. Vol. 279. P. 857–865.

Schwarzschild M. On Noise Arising from the Solar Granulation // *Astrophysical Journal*. 1948. Vol. 107. P. 1.

Stepanov A. V., Zaitsev V. V., Nakariakov V. M. Coronal seismology // *Physics Uspekhi*. 2012. Vol. 55. P. 4.

Torrence C., Compo G. P. A Practical Guide to Wavelet Analysis // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 1998. Vol. 79. P. 61–78.

Uchida Y. Diagnosis of Coronal Magnetic Structure by Flare-Associated Hydromagnetic Disturbances // *Publications of the Astronomical Society of Japan*. 1970. Vol. 22. P. 341.

Vecchio A., Cauzzi G., Reardon K. P., Janssen K., Rimmele T. Solar atmospheric oscillations and the chromospheric magnetic topology // *Astronomy & Astrophysics*. 2007. Vol. 461. P. L1–L4.