

На правах рукописи

РУДЕРМАН Михаил Соломонович

**ИЗГИБНЫЕ ВОЛНЫ И КОЛЕБАНИЯ
В МАГНИТНЫХ ТРУБКАХ
В СОЛНЕЧНОЙ АТМОСФЕРЕ**

Специальность: 01.03.03 — Физика Солнца
01.02.05 — Механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
доктора физико-математических наук

Рудерман

Москва — 2016

Работа выполнена в Институте космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН)

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией геоэлектродинамики Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта Российской академии наук (ИФЗ РАН)

ПОХОТЕЛОВ Олег Александрович

доктор физико-математических наук, профессор кафедры математики физического факультета Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова» (МГУ)

СОКОЛОВ Дмитрий Дмитриевич

член-корреспондент Российской академии наук, доктор физико-математических наук, научный руководитель Главной (Пулковской) астрономической обсерватории Российской академии наук (ГАО РАН)

СТЕПАНОВ Александр Владимирович

Ведущая организация:

Институт прикладной физики Российской академии наук (ИПФ РАН)

Защита диссертации состоится **2 июня 2016 года в __ часов** на заседании диссертационного совета Д 003.113.03 ИКИ РАН по адресу: 117997, Москва, Профсоюзная ул., 84/32, ИКИ РАН, конференц-зал

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИКИ РАН

Автореферат разослан __ октября 2016 года

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 002.113.03



Т. М. Буринская

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Магнитное поле играет очень важную роль в динамике солнечной атмосферы. Его роль особенно выражена в короне, где магнитное давление значительно превосходит давление плазмы. В силу этого в короне характерные масштабы изменения магнитного поля, как правило, весьма велики. Однако пространственный масштаб изменения плотности плазмы может быть очень небольшим. В результате альвеновская скорость может меняться на очень малых масштабах. Замагниченная плазма с областями быстрого изменения альвеновской скорости обычно называется плазмой с магнитной структурой. Наблюдения на Skylab (Sky Laboratory, букв. небесная лаборатория — национальная американская орбитальная станция) в уже 70-х гг. прошлого столетия показали, что плазма солнечной атмосферы — типичная плазма с магнитной структурой. Эти результаты были подтверждены наблюдениями на более поздних поколениях космических аппаратов.

В однородной замагниченной плазме в магнитогидродинамическом приближении могут распространяться только три волновые моды: альвеновские, а также быстрые и медленные магнитозвуковые. Наличие магнитной структуры приводит к появлению большого количества новых волновых мод. В частности, становится возможным существование поверхностных волн, энергия которых сосредоточена вблизи некоторой поверхности, а амплитуда быстро убывает при удалении от неё.

Тот факт, что атмосфера Солнца а также, по-видимому, атмосферы многих звёзд являются плазмой с магнитной структурой привлек внимание теоретиков к исследованию МГД-волн в такой плазме. Этой проблеме было посвящено большое число публикаций в 70-х

и 80-х гг. прошлого столетия. В этих работах рассматривались простейшие магнитные структуры в плазме: магнитный разрыв, являющийся частным случаем тангенциального МГД-разрыва (магнито-гидродинамический), магнитный слой и магнитная трубка. Из этих трёх структур наибольший интерес представляет магнитная трубка, поскольку она может рассматриваться как простейшая модель корональных магнитных петель, а также некоторых магнитных конфигураций в фотосфере и хромосфере.

Интерес теоретиков к МГД-волнам в плазме с магнитной структурой значительно усилился после первого наблюдения поперечных колебаний корональных петель на космическом аппарате (КА) TRACE (Transition Region and Corona Explorer) в 1998 г. Эти колебания были интерпретированы как изгибные колебания магнитных трубок. Позже кроме стоячих волн в корональных петлях также наблюдались распространяющиеся волны. Изгибные волны также наблюдаются в волокнах протуберанцев и магнитных трубках в фотосфере и хромосфере.

Хотя изгибные волны в магнитных трубках сами по себе представляют весьма интересный феномен достойный всестороннего изучения, их основное значение определяется тем, что они являются одним из основных инструментов новой и быстро развивающейся ветви солнечной физики — корональной сейсмологии. В частности, авторы работы [Nakariakov, Ofman, 2001] использовали наблюдения стоячих волн в корональных петлях для оценки величины магнитного поля. В статье [Verwichte et al., 2004] сообщалось о первом одновременном наблюдении фундаментальной моды и первого обертона изгибных колебаний корональных петель. К настоящему времени имеется значительное количество подобных наблюдений. Характерной особенностью этих наблюдений является то, что отношение периодов фундаментальной моды и первого обертона меньше двух. Авторы работы [Andries et al., 2005] показали, что это отклонение отношения периодов от двух связано с изменением плотности вдоль петли. Они также показали, что, при достаточно разумных предположениях относительно формы петли и параметров магнитного поля и плазмы, величина отклонения отношения периодов от двух однозначно связана с отношением высоты петли к шкале высот в короне. Таким образом, они разработали метод оценки шкалы высот в короне.

Изгибные волны в магнитных трубках являются лишь одной модой из большого числа волновых мод, которые могут существовать в плазме с магнитной структурой. Однако, благодаря их особому

му значению для солнечной физики, они продолжают привлекать повышенное внимание исследователей с самого момента их первого наблюдения в 1998 г. В большинстве статей, посвящённых наблюдениям или теоретическому исследованию этих волн, цитируются две работы [Aschwanden et al., 1999; Nakariakov et al., 1999], в которых сообщалось о первом наблюдении поперечных колебаний корональных петель. К настоящему времени каждая из этих работ процитирована около 500 раз, следовательно, средняя цитируемость за год более 30 раз. Эти цифры дают оценки снизу для общего числа статей об изгибных волнах в солнечной атмосфере опубликованных начиная с 1999 г. и для среднего числа статей публикуемых ежегодно.

В первых теоретических работах, посвящённых изгибным волнам в солнечной атмосфере, использовалась простейшая модель прямой магнитной трубки с однородной плотностью плазмы. Однако довольно быстро стало понятно, что необходимо рассматривать более сложные модели. В частности, для оценки шкалы высот по наблюдаемому отношению периодов фундаментальной моды и первого обертона изгибных колебаний корональных петель необходимо учесть изменение плотности вдоль магнитной трубки. Для использования наблюдений изгибных колебаний в корональной сейсмологии важно построить модели, как можно более полно описывающие реальные магнитные трубки в солнечной атмосфере. Затем необходимо выделить параметры трубок, существенные для сейсмологии. В частности, необходимо исследовать важность следующих параметров магнитных трубок:

- форма трубки;
- форма сечения трубки;
- закон изменения плотности вдоль трубки и в поперечном направлении;
- закрученность магнитных линий;
- кручение оси трубки, связанное с тем, что она не лежит в одной плоскости и является трёхмерной;
- наличие течения внутри трубки;
- влияние нелинейности.

Таким образом, задача об изгибных колебаниях магнитной трубки оказывается крайне важной для солнечной физики. Она также оказалась весьма сложной с точки зрения прикладной математики, так что её полное решение требует больших усилий теоретиков.

Цели и задачи диссертационной работы

Главной целью работы является детальное исследование зависимости изгибных колебаний магнитных трубок в солнечной атмосфере от параметров невозмущённого состояния и начальных условий; построение асимптотической теории таких колебаний. В асимптотической теории в качестве малого параметра используется отношение поперечного размера магнитной трубки к её характерной длине. При исследовании затухания изгибных колебаний используется второй малый параметр — отношение толщины переходного слоя, в котором плотность плазмы быстро меняется в поперечном направлении, к характерному размеру однородной центральной области. Работа состоит из трёх основных частей. Первая часть является вводной. Во второй части рассматриваются распространяющиеся изгибные волны в магнитных трубках. В частности, исследованы следующие проблемы:

1. Влияние изменения плотности и радиуса поперечного сечения трубки на безотражательное распространение изгибных волн (глава 2.3).
2. Резонансное затухание изгибных волн (глава 2.4).
3. Влияние нелинейности на резонансное затухание распространяющихся изгибных волн (глава 2.5).

В третьей части работы рассматриваются стоячие изгибные волны в магнитных трубках. Исследованы следующие проблемы:

1. Влияние изменения плотности и радиуса поперечного сечения вдоль трубки на собственные частоты колебаний магнитных трубок. Обсуждается приложение полученных результатов к корональной сейсмологии (глава 3.2).
2. Влияние формы поперечного сечения на собственные частоты колебаний магнитных трубок и на отношение периодов фундаментальной моды и первого обертона (Глава 3.3).
3. Изгибные колебания магнитных трубок с линиями магнитного поля, скрученными вследствие присутствия продольного тока (глава 3.4).
4. Изгибные колебания неплоских магнитных трубок. Основное внимание будет уделено поляризации колебаний (глава 3.5).
5. Колебания композитных трубок, состоящих из нескольких тонких волокон. Будет исследован простейший случай, когда трубка состоит из двух волокон (глава 3.6).
6. Влияние течения на изгибные волны (глава 3.7).

7. Резонансное затухание изгибных колебаний в трубках с аксиально-однородной и неоднородной плотностью (главы 3.8 и 3.9).
8. Резонансное затухание изгибных колебаний композитной трубки, состоящей из двух тонких волокон (глава 3.10).
9. Изгибные колебания охлаждающихся корональных петель и эволюция их амплитуды при одновременном действии охлаждения и резонансного затухания (глава 3.11).
10. Резонансное затухание изгибных колебаний с точки зрения преобразования волновых мод (глава 3.12).

Научная новизна работы

Новизна заключается в том, что впервые была разработана систематическая асимптотическая теория изгибных колебаний магнитных трубок. Эта теория использована для исследования зависимости характеристик распространяющихся и стоячих изгибных волн от параметров невозмущённого состояния и начальных условий. Результаты исследования применяются к корональной сейсмологии. Впервые изучена зависимость результатов корональной сейсмологии от предположений, сделанных относительно параметров осциллирующих структур.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Выведено уравнение, описывающее изгибные волны в тонкой магнитной трубке с плотностью и радиусом поперечного сечения, изменяющимися вдоль трубки.
2. Получено уравнение, описывающее распространение нелинейных изгибных волн по тонкой магнитной трубке. С помощью этого уравнения показано, что нелинейность может существенно ускорять резонансное затухание распространяющихся изгибных волн.
3. Исследовано влияние расширения корональной магнитной петли на определение шкалы высот по отношению периодов фундаментальной моды и первого обертона изгибных колебаний корональной петли.
4. Впервые исследованы изгибные колебания магнитных трубок с эллиптическим сечением. Показано, что в этом случае

имеется две фундаментальные моды изгибных колебаний: одна поляризованная вдоль большой оси эллиптического сечения и другая — вдоль малой. Этот результат верен для каждого обертона.

5. Впервые аналитически исследованы изгибные колебания двух параллельных магнитных трубок. Получены выражения для частот и декрементов резонансного затухания.
6. Впервые была исследована эволюция амплитуды вследствие охлаждения петли. Получено выражение для адиабатического инварианта, сохраняющегося во время эволюции колебания, при условии, что характерное время затухания волны много больше периода колебаний. Показано, что охлаждение петли вызывает увеличение амплитуды колебаний.

Достоверность результатов

Достоверность результатов, представленных в диссертации, базируется на использовании общепризнанных моделей физических явлений, методов и подходов магнитной гидродинамики. Правильность выбранных теоретических подходов также подтверждается и тем, что ряд полученных в работе результатов хорошо согласуется с наблюдательными данными, полученными на разных космических аппаратах.

Практическая ценность

Практическая ценность диссертационной работы состоит в том, что, используя асимптотические методы, удалось создать достаточно полную теорию изгибных колебаний магнитных трубок в солнечной атмосфере. Эта теория может быть использована при интерпретации наблюдательных данных, полученных на космических аппаратах. Она также может быть использована для определения стратегии наблюдений, поскольку позволяет определить параметры изгибных колебаний, которые наиболее важны для корональной сейсмологии. Наконец, результаты диссертации могут быть использованы для интерпретации наблюдений волн и колебаний в атмосферах звёзд.

Апробация

Работы, вошедшие в диссертацию, обсуждались на семинарах лаборатории физической газовой динамики Института проблем механики РАН (руководитель — проф. В. Б. Баранов), на семинарах по прикладной математике в университетах Сент-Эндрюсса (University of St Andrews, Шотландия), Лидса (University of Leeds, Великобритания), Шеффилда (University of Sheffield, Великобритания), Лёвенском (University of Leuven, Бельгия), а также на физическом семинаре Университета Балеарские острова (University of Balearic Islands, Испания).

Основные положения и результаты, вошедшие в диссертацию, докладывались на российских и международных конференциях, в том числе:

- 8-я (2013) и 9-я (2014) Ежегодная конференция «Физика плазмы в Солнечной системе», ИКИ РАН;
- 40-я научной ассамблее КОСПАР, Москва (2014);
- Генеральные ассамблеи Европейского геофизического союза (European Geosciences Union General Assembly, 2013, 2014);
- 10-я (2002) и 11-я (2005) Конференции секции Солнечной физики объединённого отделения астрофизики Европейского физического общества и Европейского астрономического общества совместно с Комитетом европейских солнечных радиоастрономов (CESRA) и Объединённой организацией солнечных обсерваторий (JOSO);
- Симпозиум Международного астрономического союза (Венесуэла, 2007 г.);
- Конференции BUKS (Belgium – United Kingdom – Spain) (2009, 2010, 2011, 2012, 2015);
- Ежегодные Международные конференции Isradynamics Conference: Dynamical Processes in Space and Astrophysical Plasmas («Динамические процессы в космической плазме», Израиль, 2006, 2007, 2008, 2010, 2011, 2012, 2014 гг.);
- Британская национальная астрономическая конференция (National Astronomy Meeting, 2012);
- Ежегодные Британские коллоквиумы по прикладной математике (2004, 2005, 2006, 2007);
- Ежегодные Британские конференции по магнитной гидродинамике (2005, 2006, 2007, 2009, 2011, 2012).

Публикации и личный вклад автора

По теме диссертации автором опубликовано в ведущих рецензируемых журналах 40 работ. Результаты, которые вошли в данную диссертацию, опубликованы в 30 статьях в ведущих рецензируемых журналах. Все основные результаты диссертации опубликованы в журналах из перечня ВАК (Высшая аттестационная комиссия при Министерстве образования и науки Российской Федерации). Вклад автора во все рассмотренные в диссертации задачи является основным. Автором осуществлялись: физические и математические постановки всех задач, вошедших в диссертационную работу; разработка оригинальных асимптотических методов решения задач, связанных с изгибными колебаниями магнитных трубок и с их затуханием вследствие резонансного поглощения; приложение полученных результатов к интерпретации наблюдательных данных; подготовка текстов публикаций, а также переписка с редакциями журналов и рецензентами.

Структура и объём диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, трёх частей, заключения и списка литературы. Первая часть является вводной. В ней даётся исторический обзор исследований по теории МГД-волн в плазме с магнитной структурой. В ней также приводятся основные уравнения МГД, используемые в работе, и дано краткое описание волновых мод в однородной магнитной трубке. Во второй части рассматриваются распространяющиеся изгибные волны, она состоит из введения и четырёх глав. В третьей части рассматриваются стоячие изгибные волны в магнитных трубках, эта часть состоит из введения и 11 глав. Работа изложена на 369 страницах, включает в себя 56 рисунков, 162 библиографические ссылки.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследуемой проблемы, сформулированы цели диссертационной работы и её научная новизна, представлены положения, выносимые на защиту.

Первая часть диссертации посвящена общей проблеме теоретического исследования волн и колебаний в плазме с магнитной структурой и применению теоретических результатов к интерпретации наблюдаемых волновых процессов в атмосфере Солнца.

В главе 1.1 представлен исторический обзор ранних наблюдений структуры солнечной атмосферы. Данные наблюдений на Skylab с 1973 по 1979 г. показали, что солнечная атмосфера является сильно неоднородной (см., напр., обзоры [Kjeldseth-Мое, Breke, 1998; Priest, 1978; Schrijver et al., 1997]). В частности, магнитное поле в нижних слоях солнечной атмосферы (фотосфере и нижней части хромосферы) сосредоточено в магнитных трубках, где оно достигает интенсивности в несколько килогаусс. В более высоких слоях солнечной атмосферы (верхней части хромосферы и, особенно, короне) магнитное давление сильно превышает плазменное, что исключает существование областей, свободных от магнитного поля, и магнитное поле там более однородно, чем в нижних слоях. Однако эти слои характеризуются высокой неоднородностью плотности плазмы. Это, в свою очередь, приводит к сильной неоднородности альвеновской скорости. Таким образом, стало понятно, что солнечная атмосфера является типичным примером плазмы с магнитной структурой.

Открытие магнитной структуры в атмосфере Солнца вызвало повышенный интерес теоретиков к изучению распространения МГД-волн в плазме с магнитной структурой. Было опубликовано большое количество работ, посвящённых изучению распространения МГД-волн в плазме с магнитной структурой. В большинстве этих работ рассматривались волны в простейших магнитных структурах, каковыми являются магнитный разрыв, магнитный слой и магнитная трубка. По-видимому, наиболее цитируемыми из этих публикаций являются работы [Edwin, Roberts, 1982, 1983; Roberts, 1981a, b]. В течение довольно длительного времени исследование волн и колебаний в магнитных трубках оставалось чисто теоретическим, поскольку не было прямых наблюдений этих волн. Ситуация резко изменилась после запуска КА TRACE. С помощью этого аппарата были получены первые прямые наблюдения волн и колебаний в солнечной короне. 14 июля 1998 г. на борту TRACE наблюдались поперечные колебания корональных магнитных петель, вызванные произошедшей неподалёку солнечной вспышкой. Результаты этих наблюдений были представлены в статьях [Aschwanden et al., 1999; Nakariakov et al., 1999]. К настоящему времени накопилось достаточно большое количество наблюдений

поперечных колебаний корональных петель (см. обзорную статью [Aschwanden, 2009]). Поперечные колебания также наблюдались с помощью телескопа SOT (Solar Optical Telescope) на борту КА Hinode в магнитных волокнах протуберанцев [Okamoto et al., 2007].

На борту КА TRACE, Hinode и SoHO (Solar and Heliospheric Observatory) наблюдались также другие виды волн и колебаний, такие как распространявшиеся вдоль корональных петель медленные магнитозвуковые волны [Berghmans, Clette, 1999; Robbrecht et al., 2001], стоячие медленные магнитозвуковые волны в горячих корональных петлях [Kliem et al., 2002; Wang et al., 2002] и распространяющиеся изгибные волны [De Pontieu et al., 2007; He et al., 2009].

Исследование волн и колебаний в солнечной атмосфере приобрело особую актуальность после возникновения новой ветви солнечной физики, получившей название «корональная сейсмология». Её задача — получение информации о параметрах плазмы и магнитного поля в солнечной короне на основе наблюдения волн и колебаний. Основные идеи корональной сейсмологии были сформулированы в работах [Roberts et al., 1984; Rosenberg, 1970; Uchida, 1970]. Однако бурное развитие корональной сейсмологии началось с запуском космических аппаратов TRACE и SoHO в конце прошлого века. Её первые успехи связаны с наблюдением поперечных колебаний корональных магнитных петель. Авторы работы [Nakariakov, Ofman, 2001] использовали эти колебания для оценки магнитного поля в корональных петлях. Авторы статьи [Andries et al., 2005] разработали и успешно применили метод оценки шкалы высот с помощью одновременного наблюдения фундаментальной моды и первого обертона поперечных колебаний магнитных петель.

В последнее время существенный прогресс был сделан в сейсмологии протуберанцев (см., напр., [Arregui, Ballester, 2011; Terradas et al., 2008]). Предпринимаются попытки использовать методы корональной сейсмологии для определения параметров плазмы и магнитного поля в хромосфере. В связи с этим было предложено ввести новое понятие: «магнитная сейсмология».

В главе 1.2 представлены основные уравнения, используемые в работе. Это стандартные уравнения одножидкостной магнитной гидродинамики. Даже в наиболее разреженной части солнечной атмосферы, которой является корона, время свободного пробега протонов составляет несколько секунд, в то время как периоды рассматриваемых волн и колебаний равны нескольким минутам. Благодаря этому гидродинамическое описание движения плазмы является вполне обоснованным.

Уравнение индукции используется в простейшей форме с изотропной проводимостью. В уравнении энергии пренебрегаем всеми диссипативными членами, в результате чего оно сводится к уравнению сохранения энтропии. В уравнении движения присутствует сила вязкости. Выражение для силы вязкости даётся в двух альтернативных формах, одна из которых соответствует изотропной вязкости, а другая — сильно анизотропной.

На первый взгляд пренебрежение диссипативными членами в уравнении энергии и использование изотропной проводимости в уравнении индукции представляется неправомерным. Однако большая часть результатов, представленных в диссертации, получена с использованием уравнений идеальной магнитной гидродинамики, где нет никаких диссипативных членов. Фактически, диссипативные члены нужны только для устранения сингулярности на резонансной поверхности при исследовании резонансного затухания волн. Многочисленные аналитические и численные исследования показывают, что декремент резонансного затухания не зависит от того, какой вид диссипации используется для устранения сингулярности. Этот декремент определяется исключительно параметрами невозмущённого состояния, это доказывает, что форма диссипативных членов в уравнениях магнитной гидродинамики не важна.

В главе 1.3 кратко изложена теория волн в однородных прямых магнитных трубках. Эта теория была достаточно полно развита в 70-х и начале 80-х гг. XX столетия (см., напр., [Edwin, Roberts, 1983]). Выведено дисперсионное уравнение для захваченных волн, т.е. для волн, амплитуда которых экспоненциально затухает вдали от магнитной трубки. В длинноволновом приближении получены решения дисперсионного уравнения, соответствующие изгибным и симметричным волнам. Эти решения были впервые получены, соответственно, авторами [Рютов, Рютова, 1976; Defouw, 1976]. Представлена графическая зависимость фазовой скорости волн в магнитной трубке от волнового числа для типичных условий в короне.

Во второй части диссертации рассматриваются распространяющиеся волны в магнитных трубках.

Глава 2.1 носит вводный характер. В ней кратко описываются наблюдения распространяющихся изгибных волн по магнитным трубкам в солнечной атмосфере.

Распространяющиеся изгибные волны в корональных магнитных петлях наблюдались с помощью коронального многоканального поляриметра (Coronal Multichannel Polarimeter, CoMP), размещённого

в Национальной солнечной обсерватории в Нью-Мексико [Tomczyk et al., 2007]. Позже изгибные волны в корональных магнитных петлях наблюдались с помощью прибора для съёмки солнечной атмосферы AIA (Atmospheric Imaging Assembly) на борту космической обсерватории SDO (Solar Dynamic Observatory) [McIntosh et al., 2011]. Распространяющиеся изгибные волны наблюдались также в спикулах с помощью телескопа SOT на борту КА Hinode [De Pontieu et al. 2007; He et al. 2009], и с помощью телескопа XRT (X-ray Telescope) также на борту Hinode в мягких рентгеновских джетах [Cirtain et al., 2007], а также в протуберанцах [Arregui et al., 2012]. Важно отметить, что, в то время как распространяющиеся изгибные волны в корональных магнитных петлях имеют очень малую амплитуду и адекватно описываются линейной теорией, аналогичные волны могут иметь достаточно большие амплитуды в протуберанцах и всегда имеют большую амплитуду в спикулах. Такие волны должны описываться в рамках нелинейной теории.

В главе 2.2 выводится уравнение, описывающее изгибные волны в тонких трубках с радиусом сечения, и плотность плазмы изменяющимися вдоль трубки. Вывод основан на использовании линеаризованных уравнений магнитной гидродинамики в приближении холодной плазмы. Уравнение получается в основном приближении асимптотического разложения по малому параметру, равному отношению характерного радиуса трубки в характерной длине волны. Это уравнение имеет вид волнового уравнения со скоростью, равной локальной скорости распространения изгибных волн в длинноволновом приближении. Зависимая переменная равна отношению смещения трубки к локальному радиусу поперечного сечения. Результаты этой главы опубликованы в работах [Dymova, Ruderman, 2005; Ruderman et al., 2008].

В главе 2.3 рассматривается безотражательное распространение изгибных волн в корональных магнитных петлях. Представлена общая теория безотражательного распространения волн, описываемых волновым уравнением. Показано, что эффект безотражательного распространения имеет место, когда локальная фазовая скорость является линейной или квадратичной функцией расстояния вдоль волновода. В этом случае волновое уравнение с переменной фазовой скоростью может быть преобразовано в уравнение Клейна-Гордона с постоянными коэффициентами.

Теория безотражательного распространения применяется к распространяющимся изгибным волнам в корональных петлях. Предполагается, что плотность плазмы не меняется в радиальном на-

правлении, однако как плотность, так и радиус сечения трубки могут изменяться вдоль магнитной трубки, используемой в качестве модели корональной петли. Рассматриваются магнитные петли, имеющие форму полукруга и погружённые в изотермическую атмосферу. Предполагается, что петля симметрична относительно вершины и что фазовая скорость изгибных волн также симметрична относительно вершины и является квадратичной функцией расстояния вдоль петли. Это предположение определяет зависимость радиуса поперечного сечения петли от расстояния вдоль петли. Модель содержит два свободных параметра: отношение высоты петли к атмосферной шкале высот и коэффициент расширения петли, равный отношению радиусов поперечного сечения в вершине и у основания петли. Было сделано достаточно естественное предположение, что радиус поперечного сечения возрастает с высотой. Это предположение накладывает ограничение снизу на интервал возможных значений параметра расширения петли. Этот нижний предел является монотонно возрастающей функцией первого параметра. Однако ограничение не слишком сильное — даже при отношении высоты петли к атмосферной шкале высот, равном двум, минимальное значение параметра расширения петли равно 1,234. Построены графики зависимости радиуса поперечного сечения от расстояния вдоль петли при различных значениях отношения высоты петли к атмосферной шкале высот и коэффициента расширения петли. Исследованы свойства изгибных волн, распространяющихся без отражения вдоль корональных петель. Результаты этой главы опубликованы в работе [Ruderman et al., 2013].

В главе 2.4 рассматривается резонансное затухание изгибных волн. Движение плазмы описывается линеаризованными уравнениями магнитной гидродинамики. В тонком диссипативном слое, охватывающем резонансную поверхность, учитывается вязкость, а вне этого слоя используются уравнения идеальной магнитной гидродинамики. В невозмущённом состоянии имеется прямая тонкая магнитная трубка. Плотность плазмы постоянна во внутренней части трубки и вне трубки и монотонно убывает в тонком переходном слое от величины внутри трубки до величины в окружающей плазме.

Уравнения диссипативной магнитной гидродинамики решены в диссипативном слое. Показано, что возмущение магнитного давления практически не меняется поперёк магнитного поля. С помощью решения уравнений диссипативной магнитной гидродинамики вычислено изменение радиального смещения плазмы поперёк

диссипативного слоя. Формулы, определяющие изменение радиального смещения и возмущения магнитного давления поперёк диссипативного слоя, называются формулами связи. С их помощью определено изменение радиального смещения поперёк неоднородной переходной области. Формулы связи используются для получения выражения для пространственного декремента распространяющихся волн. Важным свойством декремента является то, что он пропорционален отношению толщины переходного слоя к радиусу трубки, а также частоте волны. Последнее означает, что резонансное затухание может служить фильтром, удаляющим высокочастотную составляющую широкополосного возмущения. Результаты, представленные в этой главе, опубликованы в работах [Goossens et al., 1995; Ruderman et al., 1995], а также в обзорной статье [Goossens, Ruderman, 1995].

В главе 2.5 исследуется влияние нелинейности на распространение изгибных волн в магнитных трубках. В невозмущённом состоянии вне трубки магнитное поле отсутствует и плазма однородна, а в трубке магнитное поле параллельно оси трубки. Трубка состоит из внутренней части и окружающей её кольцевой области. Во внутренней части плотность плазмы и магнитное поле однородны. В кольцевой области магнитное поле убывает до нуля, а плотность плазмы убывает от её величины во внутренней области до величины вне трубки. Предполагается, что альвеновская скорость — монотонно убывающая функция в кольцевой области. Также предполагается, что безразмерная амплитуда волны мала и может рассматриваться в качестве малого параметра в асимптотической теории, которая используется для вывода нелинейного уравнения, описывающего распространение вдоль трубки волн, возбуждаемых внешним источником возмущений, расположенным у основания трубки. Фазовая скорость волн близка к изгибной скорости. Внутри кольцевой области находится цилиндрическая поверхность, где локальная альвеновская скорость равна фазовой скорости волны. В окрестности этой поверхности имеет место эффективная передача волновой энергии от глобальной волны к локальным альвеновским колебаниям, т.е. происходит резонансное поглощение энергии глобальной волны.

Частный класс решений нелинейного уравнения в виде винтовых волн исследован численно. Показано, что нелинейность обеспечивает передачу энергии от фундаментальной волновой моды к обертонам, что приводит к усилению резонансного поглощения и, как следствие, к ускорению затухания волны. Нелинейность также

приводит к деформации границы трубки, связанной с генерацией желобковых волновых мод. Основным результатом этой главы заключается в том, что нелинейность может значительно увеличивать эффективность резонансного затухания и, таким образом, существенно уменьшать расстояние, на котором волна затухает. Результаты этой главы опубликованы в работах [Ruderman, 1992a, b; Ruderman, Goossens, 1993; Ruderman et al., 2000, 2010].

В третьей части диссертации рассматриваются стоячие изгибные волны в магнитных трубках.

Глава 3.1 носит вводный характер. В ней кратко описаны наблюдения стоячих изгибных волн в магнитных трубках в солнечной атмосфере. К настоящему времени накопилось большое количество наблюдений этого явления (см. обзорную статью [Andries et al., 2009]). Основное значение изгибных колебаний корональных петель связано с тем, что они являются одним из основных инструментов корональной сейсмологии. Авторы работы [Nakariakov, Ofman, 2001] использовали наблюдения изгибных колебаний корональных петель для получения оценки величины магнитного поля в корональных петлях. Авторы статьи [Andries et al., 2005] разработали метод определения шкалы высот в короне, основанный на одновременном наблюдении фундаментальной гармоники и первого обертона изгибных колебаний. В статьях [Ruderman, Roberts, 2002; Goossens et al., 2002] предложено использовать наблюдаемое затухание изгибных колебаний для получения информации о внутренней структуре корональных петель. Обзор современной теории изгибных колебаний корональных магнитных петель дан в обзорной статье [Ruderman, Erdelyi, 2009]. Изгибные колебания волокон протуберанцев широко используются в их сейсмологии (см. обзорные статьи [Arregui, Ballester, 2011; Arregui et al., 2012]).

В главе 3.2 исследуются изгибные колебания магнитных трубок с плотностью плазмы и радиусом поперечного сечения, изменяющимися вдоль трубки. Рассматриваются две модели корональных магнитных петель. В обеих моделях предполагается, что трубки имеют форму полукруга и погружены в изотермическую атмосферу, а температура плазмы одна и та же внутри и вне трубки. Влияние кривизны трубки на её изгибные колебания не учитывается, из чего следует, что форма трубки влияет только на изменение плотности вдоль её оси. Собственные волновые моды описываются волновым уравнением, выведенным в главе 2.2 и дополненным граничными условиями на концах трубки, следующими

из предположения о вмороженности оснований корональных петель в плотную фотосферу.

В первой модели радиус трубки изменяется таким образом, что фазовая скорость изгибных волн является квадратичной функцией расстояния вдоль оси трубки. В этом случае волновое уравнение с переменной фазовой скоростью сводится к уравнению Клейна-Гордона с постоянными коэффициентами. В результате этого выражения для частот фундаментальной моды и обертонов изгибных колебаний находятся аналитически. Во второй модели зависимость радиуса трубки от координаты вдоль её оси описывается гиперболической функцией. В этом случае частоты фундаментальной моды и обертонов могут быть найдены только численно.

Рассматривается применение полученных результатов к корональной сейсмологии. Обсуждается метод определения шкалы высот по отношению частот первого обертона и фундаментальной моды найденному из наблюдений. В первой модели это отношение не зависит от шкалы высот, следовательно, можно получить только оценку шкалы высот сверху. Эта оценка получена для трёх случаев одновременного наблюдения фундаментальной моды и первого обертона, представленных в статье [Van Doorslaere et al., 2007]. Во всех трёх случаях оценка оказывается абсурдной.

Вторая модель позволяет получить оценку шкалы высот по известному отношению частот первого обертона и фундаментальной моды. По сравнению с моделью, использованной в работе [Andries et al., 2005], в этой модели появляется дополнительный параметр — степень расширения петли, равная отношению радиусов сечения в вершине и у основания петли. Показано, что при заданном отношении частот первого обертона и фундаментальной моды, оценка шкалы высот убывает при увеличении степени расширения петли. В частности, показано, что оценка шкалы высот в 109 Мм, полученная для третьего случая одновременного наблюдения фундаментальной моды и первого обертона, представленных в статье [Van Doorslaere et al., 2007], уменьшается до типичного значения 50 Мм при увеличении степени расширения петли от 1 до 1,5. Проведённый анализ показывает, что метод оценки шкалы высот по одновременному наблюдению фундаментальной моды и первого обертона весьма чувствителен к выбору модели корональной петли. Результаты, приведённые в этой главе, опубликованы в работах [Dymova, Ruderman, 2006a; Ruderman et al., 2008].

В главе 3.3 исследуется влияние формы поперечного сечения на собственные частоты колебаний магнитных трубок. Были рас-

смотрены изгибные и желобковые колебания однородной трубки с эллиптическим сечением и произвольным отношением большой полуоси сечения к длине трубки. Аналитические выражения для частот колебаний удаётся получить только в приближении тонкой трубки. Показано, что существуют две бесконечные монотонные последовательности частот, одна убывающая, а другая — возрастающая. Обе последовательности сходятся к частоте изгибных колебаний тонкой трубки с круговым сечением. Первый член первой последовательности является частотой изгибной моды, поляризованной в направлении малой оси эллиптического сечения, а остальные члены — частотами желобковых мод. Первый член второй последовательности является частотой изгибной моды, поляризованной в направлении большой оси эллиптического сечения, а остальные члены — опять же — частотами желобковых мод. При умеренном отношении полуосей эллиптического сечения, не превышающем двух, частоты двух изгибных волновых мод, одной — поляризованной вдоль малой оси сечения и другой — вдоль большой, отличаются от частоты изгибных колебаний тонкой трубки с круговым сечением меньше чем на 20 %.

Результаты, полученные для трубки с постоянной плотностью, были обобщены для трубки с плотностью, изменяющейся вдоль оси. При этом с самого начала использовалось приближение тонкой трубки. В основном, качественно результаты совпадают с результатами, полученными для трубки с постоянной плотностью. Единственным качественным отличием является отклонение от двух отношения частот первого обертона к частоте фундаментальной моды изгибных колебаний. В последнем разделе настоящей главы рассмотрены изгибные колебания магнитной трубки, в которой эллиптичность сечения связана с учётом кривизны трубки. В рассмотренной модели сечение трубки является эллипсом, в котором ось, перпендикулярная плоскости петли, постоянна вдоль петли, а другая ось возрастает от основания к вершине. В результате в общем случае частота изгибных колебаний, поляризованных перпендикулярно плоскости петли (горизонтальные колебания) отличается от частоты колебаний, поляризованных в плоскости петли (вертикальные колебания). Большинство наблюдаемых изгибных колебаний корональных петель поляризованы горизонтально. Однако иногда наблюдаются и вертикально поляризованные колебания [Aschwanden, Schrijver, 2011; Wang, Solanki, 2004]. К настоящему времени нет информации об одновременном наблюдении вертикально и горизонтально поляризованных изгибных колебаний корональных

магнитных петель. Произвольное возмущение корональной петли должно вызывать колебания обоих видов. По-видимому, тот факт, что до сих пор наблюдались только колебания с одним видом поляризации, объясняется тем, что в наблюдениях доминирует тот вид колебаний, который имеет большую амплитуду. Можно надеяться, что в дальнейшем, при улучшении качества наблюдений, будут фиксироваться колебания корональных петель, являющиеся суперпозицией вертикально и горизонтально поляризованных колебаний. Отношение частот колебаний с двумя типами поляризации может использоваться в сейсмологических целях для получения информации о поперечном сечении корональных петель. Результаты, приведённые в этой главе, опубликованы в работах [Morton, Ruderman, 2011; Ruderman, 2003, 2009].

Глава 3.4. Во всех предыдущих главах диссертации предполагалось, что магнитное поле потенциально в невозмущённом состоянии, т.е. в невозмущённом состоянии отсутствует электрический ток. Однако потенциальное восстановление магнитного поля в короне по измерению поля в фотосфере показывает, что площадь поперечного сечения петли в вершине должно в несколько раз превышать площадь сечения у основания петли. Этот результат противоречит наблюдениям, показывающим, что площадь сечения почти не меняется вдоль петли. Один из способов согласовать теорию с наблюдениями — отказаться от модели потенциального невозмущённого магнитного поля и сделать предположение, что имеется продольный ток в петле. Этот ток вызывает закрутку магнитных линий вокруг оси петли. В связи с этим встаёт проблема исследования влияния продольного тока на изгибные колебания магнитной трубки. Влияние продольного тока на распространяющиеся изгибные волны было исследовано в работе [Bennett et al., 1999] в приближении несжимаемой жидкости, справедливость применения которого для исследования волн в короне весьма сомнительна.

Настоящая глава диссертации посвящена исследованию изгибных колебаний магнитных трубок с продольным током в приближении холодной плазмы. Предполагается что плотность плазмы как внутри, так и вне трубки может меняться вдоль трубки, но не меняется в радиальном направлении. При этом плотность плазмы внутри трубки больше, чем снаружи. Магнитное поле вне трубки имеет постоянную величину и направлено вдоль оси трубки. Поле внутри трубки имеет как аксиальную, так и азимутальную компоненты, причём предполагается, что азимутальная компонента много меньше аксиальной. Если быть точнее, считается, что отношение этих

двух компонент порядка отношения радиуса трубки R к её длине L . Рассматриваются неосесимметричные колебания, и полагается, что возмущения всех величин пропорциональны $\exp(im\phi)$, где m — целое число, отличное от нуля. С помощью разложений по малому параметру $\varepsilon = R/L$ показано, что собственные частоты и собственные функции колебаний описываются задачей Штурма-Лиувилля.

Наиболее важный результат, полученный в этой главе, заключается в том, что скрученность трубки не влияет на частоту изгибных колебаний ($|m| = 1$). Однако оказывается, что этот результат верен только для частной невозмущённой конфигурации, рассмотренной в данной главе. Авторы работы [Terradas, Goossens, 2012] рассмотрели стоячие волны в магнитной трубке, в которой кручение магнитных линий сосредоточено в кольцевой области внутри трубки. В этом случае оказывается, что частота изгибных колебаний зависит от степени скрученности магнитных линий. Результаты данной главы опубликованы в работе [Ruderman, 2007].

В главе 3.5 изучаются изгибные колебания неплоских магнитных трубок. Наблюдения показывают, что довольно часто ось петли не является плоской кривой [Aschwanden, 2009; Aschwanden et al., 2008]. Это означает, что она имеет не только кривизну, но и кручение. Поэтому представляется важным исследовать влияние кручения оси магнитной петли на её собственные колебания. Предложена простая модель неплоской петли, в которой ось петли является частью винтовой линии. Поперечное сечение петли везде круговое с радиусом a и центром на оси петли. При этом предполагается, что a много меньше радиуса кривизны петли. Считается, что плотность плазмы внутри петли больше плотности снаружи и обе плотности могут меняться вдоль петли, однако не меняются в направлениях поперёк петли. В криволинейных координатах граница петли является координатной поверхностью, а ось петли — координатной линией. Линейные уравнения идеальной магнитной гидродинамики и граничные условия в криволинейных координатах используются для вывода уравнения, описывающего изгибные колебания магнитной петли. Для этого использовался асимптотический метод, основанный на разложении возмущений всех величин в ряды по малому параметру, равному отношению радиуса поперечного сечения к длине петли. Оказалось, что выведенное уравнение в точности совпадает с уравнением, описывающим изгибные колебания прямой трубки с круговым сечением постоянного радиуса. Это означает, что, аналогично кривизне петли, её кручение напрямую не влияет на собственные частоты изгибных колебаний. Оно может влиять на

эти частоты только косвенно, модифицируя зависимость плотности от расстояния вдоль петли.

Главный эффект, связанный с кручением петли, это изменение поляризации колебаний вдоль петли. Смещение петли везде ортогонально оси петли. В общем случае смещение каждой точки оси эллиптически поляризовано в плоскости, ортогональной оси петли. Отношение осей эллипса поляризации не меняется вдоль петли, и угол между большей осью эллипса поляризации и главной нормалью к оси петли также остаётся постоянным. Таким образом, вследствие кручения оси петли, эллипс поляризации вращается при движении вдоль петли. Когда длина одной из осей поляризации равна нулю, поляризация является линейной. В этом случае угол между направлением поляризации и главной нормалью к оси везде один и тот же.

Обсуждается применение полученных результатов к корональной сейсмологии. Для этого рассмотрены линейно поляризованные изгибные колебания неплоской петли, наблюдаемые с направления определяемого вектором \mathbf{S} . Предполагается, что наблюдаемое колебание петли является фундаментальной модой, т.е. колебание не имеет узлов нигде, кроме оснований петли. Визуально можно наблюдать только смещение петли ортогональное вектору \mathbf{S} . Таким образом, будет наблюдаться узел колебания в точке, где смещение параллельно вектору \mathbf{S} . Выведено уравнение, которое определяет точку на оси петли, где смещение параллельно вектору \mathbf{S} , в предположении, что колебание петли линейно поляризовано. Допустим теперь, что наблюдалось изгибное колебание корональной петли с узлом в некоторой точке. Если данное уравнение не имеет решений, то это означает, что в случае, когда колебание является фундаментальной модой, узел не будет наблюдаться. Данный результат будет серьёзным свидетельством в пользу того, что наблюдавшееся колебание было не фундаментальной модой, а первым обертоном. Если уравнение имеет решение, то далее необходимо сравнить два положения узла: одно, найденное из наблюдений, и другое, найденное из решения этого уравнения. Если эти два положения различаются сильно, то это снова следует рассматривать как свидетельство в пользу того, что наблюдавшееся колебание было не фундаментальной модой, а первым обертоном. Если же два положения близки, то это будет означать что, скорее всего, наблюдавшееся колебание было фундаментальной модой, а наблюдавшееся наличие узла — чисто наблюдательный эффект. Результаты данной главы опубликованы в работе [Ruderman, Scott, 2011].

В главе 3.6 изучаются изгибные колебания двух параллельных магнитных трубок. В настоящее время не ясно, являются ли магнитные петли монолитными, или они состоят из пучка более тонких магнитных трубок с различными плотностями и температурами. Если последнее предположение верно, то встаёт задача исследования изгибных колебаний пучка магнитных трубок. Иногда наблюдаются одновременные колебания системы нескольких расположенных близко друг от друга корональных петель. В связи с этим снова возникает задача исследования близко расположенных друг к другу систем магнитных трубок.

Естественно начать изучение колебаний системы магнитных трубок с простейшего случая, когда имеется всего две трубки. В настоящей главе для исследования колебаний двух прямых параллельных магнитных трубок используются бицилиндрические координаты. Выведена система уравнений, описывающих изгибные колебания двух параллельных трубок. С помощью этой системы находятся собственные частоты и волновые моды колебаний. Вначале исследуются собственные моды однородных трубок. Затем это исследование обобщается для случая, когда плотность изменяется вдоль трубок. Для построения модели с изменяющейся плотностью уместно предположить, что имеется система, состоящая из двух корональных петель, расположенных в двух параллельных вертикальных плоскостях и имеющих форму полукруга с радиусом R . Также предполагается, что атмосфера изотермическая и температура плазмы одна и та же внутри трубок и в окружающей плазме. Из этого предположения, в частности, следует, что отношения плотностей внутри петель к плотности окружающей плазмы постоянны. Система петель моделируется системой двух параллельных прямых магнитных трубок. Таким образом, кривизной петель пренебрегается. После этого задача на собственные значения решается численно.

Обсуждается применение полученных результатов к корональной сейсмологии. Рассматривается проблема определения шкалы высот в короне с помощью отношения частот первого обертона и фундаментальной моды изгибных колебаний корональных петель. Сравниваются результаты, полученные на основе двух моделей. В первой модели предполагается, что корональная петля является монолитной магнитной трубкой. Во второй модели считается, что петля состоит из двух близко расположенных параллельных трубок. Показано, что обе модели дают одну и ту же оценку для шкалы высот, и эта оценка не зависит от отношения плотностей в трубках и в

окружающей плазме. Результаты данной главы опубликованы в работах [Van Doorsselaere et al., 2008; Robertson et al., 2010].

В главе 3.7 рассматриваются изгибные колебания корональных петель в присутствии течения. Наблюдения на борту КА SoHO [Winebarger et al., 2002], TRACE [Winebarger et al., 2001] и Hinode [Terradas et al., 2008] показывают, что течения регулярно присутствуют в корональных петлях в активных областях короны. Для исследования влияния течения используется простейшая модель сифонного течения в магнитной трубке, «создаваемого» граничным условием у одного из оснований петли. Затем численно исследуется влияние течения на частоту фундаментальной моды и на отношение частот первого обертона и фундаментальной моды.

Основные результаты, приводимые в настоящей главе, можно суммировать как следующее. Для наблюдаемых скоростей сифонных течений проведённый анализ показывает, что влияние течения на частоту фундаментальной моды и на отношение частот первого обертона и фундаментальной моды мало. Важный вывод состоит в том, что можно не учитывать влияние сифонного течения на оценку шкалы высот в короне, полученную на основе одновременного наблюдения фундаментальной моды и первого обертона. Однако необходимо подчеркнуть, что эти результаты получены в предположении, что невозмущённое состояние является стационарным, так что ни плотность плазмы, ни её скорость не меняются со временем. Результаты этой главы опубликованы в работах [Думова, Ruderman, 2006a, b, Ruderman et al., 2008].

В главе 3.8 исследуется резонансное затухание изгибных колебаний в магнитных трубках с аксиально-однородной плотностью. Уже первые наблюдения изгибных колебаний корональных петель показали, что эти колебания затухают в течение нескольких периодов [Aschwanden et al., 1999; Nakariakov et al., 1999]. В настоящее время является общепринятым, что затухание резонансных колебаний происходит вследствие резонансного поглощения. Качественно процесс резонансного затухания уже описан в главе 2.4. С использованием результатов этой главы решена начальная задача, описывающая эволюцию произвольного изгибного возмущения тонкой магнитной трубки. Предполагается, что магнитные силовые линии заморожены в плотную плазму и поэтому неподвижны. Также предполагается, что плотность не меняется вдоль трубки, но может изменяться в радиальном направлении в тонкой кольцевой области, окружающей центральную область с постоянной плотностью. В кольцевой области плотность монотонно убывает от значения во

внутренней области до значения вне трубки. Используется приближение холодной плазмы. Анализ ограничивается волновой модой, фундаментальной в аксиальном направлении. Задача с начальными условиями решается с помощью преобразования Лапласа. Решение для эволюции магнитного давления в кольцевой области выражено через обратное преобразование Лапласа. Для больших значений времени это решение стремится к собственной глобальной изгибной моде диссипативной магнитной гидродинамики. Эта мода является слабо затухающей. При больших значениях числа Рейнольдса Re декремент не зависит от Re и пропорционален отношению толщины кольцевой области l к радиусу трубки R . Исследовано также волновое движение в диссипативном слое, окружающем идеальную резонансную поверхность, которая определяется условием, что на ней локальная альвеновская частота совпадает с частотой глобальной волновой моды. Основные результаты, полученные в данной главе следующие:

- Асимптотическим состоянием колебания магнитной трубки, вызванного начальным возмущением, является слабо затухающее гармоническое колебание с частотой глобальной моды изгибных колебаний магнитной трубки.
- Изгибные колебания магнитной трубки затухают вследствие передачи энергии от глобальной волновой моды к локальным альвеновским колебаниям в диссипативном слое, охватывающем идеальную резонансную поверхность.
- Декремент колебаний не зависит от числа Рейнольдса Re , когда $Re \ll 1$, а отношение декремента к частоте колебаний порядка l/R ; таким образом, условие, что время затухания много меньше частоты колебаний эквивалентно условию $l \ll R$.
- За характерное время затухания глобальной моды колебаний энергия глобального колебания преобразуется в энергию альвеновских колебаний в диссипативном слое; за это время амплитуда колебаний в диссипативном слое достигает величины порядка начальной амплитуды колебания глобальной изгибной моды, умноженной на R/l .
- Число Рейнольдса Re влияет только на волновое движение в окрестности идеальной резонансной поверхности, следовательно, невозможно сделать никакого заключения о величине вязкости в короне на основе наблюдений затухания изгибных колебаний корональных петель.

Вывод, что условие медленного затухания эквивалентно условию $l \ll R$, особенно важен. Он, в частности, означает, что в случае, когда плотность меняется во всём поперечном сечении магнитной петли с характерным масштабом, равным R , затухание происходит за время порядка периода волны и внешнее возмущение не вызывает достаточно выраженных поперечных колебаний петли. Этот вывод объясняет, почему изгибные колебания корональных петель наблюдаются довольно редко. Результаты анализа, представленного в этой главе, опубликованы в работах [Ruderman, Roberts, 2002; Ruderman, Wright, 2000], а также в обзорной статье [Goossens et al., 2011].

В главе 3.9 изучается влияние изменения плотности вдоль магнитной трубки на резонансное затухание её изгибных колебаний. Поскольку в предыдущей главе было показано, что после короткого переходного периода произвольное возмущение возбуждает собственную моду изгибных колебаний, для упрощения анализа вместо решения начальной задачи рассматривается затухание собственных мод. Анализ был проведён в приближении холодной плазмы, а также в приближении тонкой трубки и тонкого переходного слоя. Плотность плазмы изменяется как вдоль трубки, так и в радиальном направлении. Приближение тонкого переходного слоя означает, что изменение плотности в радиальном направлении происходит только в тонком слое у границы трубки с толщиной l , много меньшей радиуса сечения трубки R . Наконец, сделано предположение, что отношение плотности внутри и вне трубки постоянно, а отношение плотности внутри переходного слоя к плотности внутри трубки зависит только от радиуса. Показано, что в нулевом приближении по малому параметру l/R , действительная часть частоты колебаний является собственным значением задачи Штурма-Лиувилля. Декремент колебаний вычисляется в следующем приближении по l/R : отношение декремента к частоте колебаний — порядка l/R . Оно оказывается в точности таким же, как и в случае трубки с плотностью, не меняющейся вдоль трубки. Поскольку декремент вычислен в главном приближении по малому параметру l/R , можно ожидать, что точность полученного результата не слишком велика. Однако сравнение с численными результатами, полученными в работе [Van Doorsselaere et al., 2004] для нестратифицированных трубок, показывает, что точность аналитического вычисления декремента очень хорошая при $l/R < 0,4$ и удовлетворительная при $0,4 < l/R < 0,6$. Таким образом, аналитический результат достаточно актуален для практически всех возможных значений параме-

тра l/R . Для приложения теоретических результатов к колебаниям корональных петель исследуется колебание петель с плотностью соответствующей квадратичной зависимости фазовой скорости изгибных колебаний от координаты вдоль петли. Для такой зависимости плотности частота собственных мод колебаний вычисляется аналитически. Определены частоты фундаментальной моды и первого обертона, а также их отношение. После этого на основе одно-временных наблюдений фундаментальной моды и первого обертона были найдены оценки шкалы высот в короне. Сравнение с оценками, полученными на основе модели полукруглой петли, находящейся в изотермической атмосфере, показывает, что оценка шкалы высот существенно зависит от использованной модели корональной петли. Данное исследование опубликовано в работе [Думова, Ruderman, 2006a].

В главе 3.10 исследуется резонансное затухание изгибных колебаний двух параллельных магнитных трубок. Предполагается, что плотность постоянна в окружающей плазме и в центральных областях трубок и меняется в радиальных направлениях в тонких переходных слоях между центральными областями трубок и окружающей плазмой. Внутри этих переходных слоёв имеются резонансные поверхности, на которых частота изгибных колебаний совпадает с локальной альвеновской частотой. Все системы двух параллельных трубок разбиваются на стандартные и аномальные. В стандартных системах имеется резонансная поверхность в каждой из трубок как для высокочастотной, так и для низкочастотной моды. В аномальных системах имеется резонансная поверхность в каждой переходной области для высокочастотной моды. Однако в случае низкочастотной моды имеется только одна резонансная поверхность, расположенная в трубке с большей плотностью в центральной области. Предположение, что переходные области тонкие, позволяет использовать регулярный метод возмущений для исследования затухания колебаний вследствие резонансного поглощения. В нулевом приближении был воспроизведён результат, полученный в разделе 3.6.4 главы 3.6 при изучении колебания двух параллельных трубок с резкими границами. В первом приближении было получено выражение для декремента, связанного с резонансным поглощением. В общем случае вычисление декремента приводит к весьма громоздким вычислениям. Поэтому вычисления проводятся только для идентичных трубок. Показано, что декремент — монотонно убывающая функция расстояния между осями трубок. Таким образом, взаимодействие между трубками уменьшает

эффективность резонансного поглощения. Другой важный результат — низкочастотные колебания затухают медленнее, чем высокочастотные. В настоящее время не существует физического объяснения этому результату. В заключение отметим, что, аналогично случаю уединённой трубки, время затухания — убывающая функция контраста плотности. Это исследование было представлено в работе [Robertson, Ruderman, 2011].

Глава 3.11 посвящена исследованию резонансного затухания изгибных колебаний остывающих корональных петель. В частности, они могут остывать с характерным временем остывания порядка нескольких периодов колебаний (см., напр., [Aschwanden, Terradas, 2008]). В связи с этим представляется важным теоретическое изучение магнитогидродинамических волн в динамической плазме. Впервые влияние охлаждения на изгибные колебания корональных петель было исследовано в работах [Morton, Erdelyi, 2009, 2010]. Было показано, что охлаждение петли вызывает уменьшение периода колебаний. Хотя, как уже упоминалось ранее, обычно изгибные колебания корональных петель быстро затухают, иногда наблюдаются колебания, амплитуда которых не меняется за всё время наблюдения. В частности, из 17 наблюдений изгибных колебаний корональных петель, описанных в работе [Aschwanden et al., 2002], в семи случаях затухание колебаний не наблюдалось. Недавно авторы работы [Aschwanden, Schrijver, 2011] сообщили о наблюдениях изгибных колебаний корональных петель, полученных с помощью прибора AIA на борту космической обсерватории SDO. В одном из наблюдений колебания были практически незатухающими. Авторы указанной работы пришли к выводу, что если предположить, что затухание петель происходит вследствие резонансного поглощения, то отношение толщины переходного слоя l к радиусу поперечного сечения трубки R должно быть много меньше единицы. Важным свойством петли с незатухающими колебаниями было то, что она охлаждалась. В связи с этим встаёт вопрос: не может ли охлаждение петли приводить к росту её амплитуды колебаний, что может компенсировать их резонансное затухание.

В качестве модели охлаждающейся петли используется прямая магнитная трубка, состоящая из центральной области и переходного слоя. Магнитное поле везде имеет постоянную величину и направление. В центральной области и вне петли плотность меняется только вдоль петли, а в переходном слое она меняется также в радиальном направлении. К тому же плотность изменяется со временем. В результате этого возникает течение плазмы вдоль пет-

ли. Движение плазмы описывается линеаризованными магнитогидродинамическими уравнениями в приближении холодной плазмы. Используется приближение тонкой трубки. Для описания изгибных колебаний применяется система двух уравнений, выведенная в главе 3.7. Эта система не является замкнутой поскольку, в дополнение к смещению оси петли, она содержит также скачки возмущения магнитного давления и смещения плазмы в радиальном направлении поперёк переходного слоя. Эффекты охлаждения и резонансного затухания исследуются в предположении, что как время охлаждения, так и время затухания много больше, чем период колебаний. Второе предположение означает, что используется приближение тонкого пограничного слоя. Два сделанных предположения позволяют использовать ВКБ-метод (Вентцеля-Крамерса-Бриллюэна). С помощью этого метода и формул связи вычисляются скачки возмущения магнитного давления и смещения плазмы в радиальном направлении поперёк переходного слоя. В результате получается замкнутое уравнение, описывающее смещение оси петли в предположении, что радиальная зависимость плотности в переходном слое линейная. После этого выводится уравнение, описывающее зависимость от времени адиабатического инварианта для изгибных колебаний магнитной трубки. В том случае, когда петля имеет резкую границу, адиабатический инвариант сохраняется. Уравнение, описывающее изменение адиабатического инварианта определяет эволюцию амплитуды колебаний.

Дополнительно было предположено, что охлаждение происходит только внутри петли, петля имеет форму полукруга, начальная температура вне и внутри петли одна и та же и температура плазмы снаружи петли не изменяется. Зависимость плотности петли от высоты описывается барометрической формулой. Наконец, предполагается, что температура внутри петли убывает экспоненциально. После этого уравнение, описывающее эволюцию амплитуды, записывается в безразмерных переменных и содержит три безразмерных параметра: отношение плотностей внутри и вне петли в начальный момент времени, отношение высоты петли к шкале высот и параметр, характеризующий эффективность резонансного поглощения. Последний пропорционален отношению толщины переходного слоя l к радиусу поперечного сечения петли R . Уравнение, определяющее эволюцию амплитуды при различных значениях первых двух параметров, решено численно. Наиболее интересным результатом является то, что охлаждение петли приводит к увеличению амплитуды колебаний, которое может компенсировать резонансное

затухание. Этот эффект делает возможным существование незатухающих колебаний. Колебания считаются незатухающими, если амплитуда в момент времени, равный времени затухания, равна начальной. Вычислено значение параметра l/R , соответствующего незатухающим колебаниям при различных значениях первых двух безразмерных параметров. На основе численных результатов можно сделать вывод, что усиление колебаний за счёт охлаждения петли не слишком эффективно. Усиление колебаний за счёт охлаждения может сбалансировать резонансное затухание петель с типичными значениями l/R (l/R порядка 0,2) только когда начальное отношение плотностей не слишком велико (меньше, либо порядка 0,3) и охлаждение происходит очень быстро — со временем порядка периода колебаний. Результаты этой главы опубликованы в работе [Ruderman, 2011b].

В главе 3.12 рассматривается затухание изгибных колебаний корональных петель вследствие преобразования волновых мод. Как уже указывалось, в настоящее время наиболее популярной теорией затухания изгибных колебаний магнитных трубок в солнечной атмосфере является резонансное поглощение. В первых работах по резонансному затуханию изгибных колебаний использовалось идеальное магнитогидродинамическое описание (см., напр., [Hollweg, Yang 1988; Sedlacek, 1971]). При этом затухание появляется благодаря наличию сингулярности на Римановой поверхности преобразования Лапласа, когда оно продолжается с комплексной плоскости, являющейся основным листом Римановой поверхности, на неосновной лист. Хотя с математической точки зрения этот подход является абсолютно корректным, возникновение затухания выглядит как математический трюк, поскольку все физические процессы, происходящие в окрестности резонансной поверхности, остаются за кадром. Позже авторы работы [Goossens et al., 1992] предложили другой подход, основанный на использовании диссипативной магнитной гидродинамики для описания движения плазмы в окрестности резонансной поверхности. Основная идея этого подхода заключается в следующем: диссипация важна только в тонком диссипативном слое, охватывающем резонансную поверхность, поскольку движение там характеризуется наличием больших градиентов. Вне диссипативного слоя движение плазмы описывается в рамках идеальной магнитной гидродинамики. Решение линейных уравнений диссипативной магнитной гидродинамики используется для вычисления скачков возмущения полного давления и нормальной компоненты скорости поперёк диссипативного слоя. В главе 2.4

получены выражения для этих скачков и указано, что они называются формулами связи.

Вначале формулы связи использовались для исследования резонансного поглощения волновой энергии в стационарной задаче, где колебания в системе вызываются внешним источником энергии. Позже авторы работы [Goossens et al., 1992] использовали формулы связи для исследования затухания волн в цилиндрической геометрии. Фактически аналогичный подход был использован в работе [Mok, Einaudi, 1985] для исследования затухания поверхностных волн, распространяющихся по тонкому переходному слою между двумя областями с однородной плазмой, хотя эти авторы не ввели понятие формул связи. Авторы были, по-видимому, первыми, кто указал, что решение в диссипативном слое, полученное для стационарной задачи, может быть использовано для описания диссипативных собственных магнитогидродинамических мод только в том случае, когда диссипация не слишком мала. Это условие может быть записано в виде $1 \ll \text{Re} < \text{Re}_c = (L/R)(R/l)^4$. Позже авторы работы [Ruderman et al., 1995] рассмотрели ту же задачу, что и авторы [Mok, Einaudi, 1985], но в том случае, когда условие $\text{Re} < \text{Re}_c$ не выполняется. Было показано, что, в то время как движение плазмы в диссипативном слое сильно отличается от движения в случае стационарной задачи, скорость затухания поверхностной волны не изменяется. В частности, формулы связи остаются теми же самыми, что и в стационарном случае.

В то время как использование формул связи в стационарной задаче абсолютно корректно, их использование в задаче с начальными значениями для описания затухания возмущений вызывает определённые сомнения. В качестве примера рассмотрим затухание изгибных колебаний корональных петель. Как было показано в главе 3.8, при не слишком ограничительных предположениях относительно начального возмущения, фундаментальная мода изгибных колебаний возникает из начального возмущения после переходного процесса с характерным временем равным периоду колебаний. Однако движение плазмы хорошо описывается нормальной модой диссипативной магнитной гидродинамики при достаточном удалении от резонансной поверхности. Вблизи резонансной поверхности движение плазмы хорошо описывается нормальной модой только при формировании пространственных масштабов порядка $\text{Re}^{-1/3}l$. Это происходит после переходного периода с характерной длительностью порядка $\text{Re}^{1/3}$, умноженного на период колебаний. Поскольку типичное значение Re в солнечной короне равно 10^{12} , это

время составляет порядка 10^4 периодов колебаний. С другой стороны, наблюдения показывают, что характерное время затухания изгибных колебаний корональных петель равно нескольким периодам колебаний.

В главе 2.4 рассмотрено резонансное затухание изгибных волн, распространяющихся по полубесконечной магнитной трубке. Было показано, что амплитуда распространяющейся волны убывает экспоненциально с расстоянием от источника возмущений. Однако в численном моделировании в работе [Pascoe et al., 2012] было найдено, что волна не затухает экспоненциально. Вместо этого на достаточно малых расстояниях зависимость амплитуды от расстояния описывается гауссовской функцией. И только на достаточно больших расстояниях эта зависимость становится экспоненциальной. Как было указано в главе 2.4, авторы работы [Hood et al., 2013] развили аналитическую теорию, объясняющую данное поведение амплитуды волны. Имеется полная аналогия между пространственным резонансным затуханием распространяющихся волн и затуханием со временем стоячих волн в магнитной трубке. Поэтому, по аналогии с распространяющимися волнами, можно ожидать, что экспоненциальное затухание не является корректным описанием зависимости амплитуды стоячих волн от времени. Причиной этого является тот факт, что экспоненциальное затухание стоячих волн было получено в предположении, что возмущение описывается собственной модой диссипативной МГД. Как было показано выше, это предположение некорректно. Целью данной главы является построение аналитической теории, описывающей затухание стоячих волн. Результаты этой теории затем сравниваются с результатами численного моделирования.

В качестве модели корональной петли в данной главе рассматривается прямая магнитная трубка. Используются приближения тонкой трубки и тонкого переходного слоя, а также холодной плазмы. Выведено интегро-дифференциальное уравнение, определяющее эволюцию смещения трубки. Для исследования затухания колебаний это уравнение решается численно при различных значениях отношения толщины переходного слоя l к радиусу трубки R . Найдено, что для достаточно малых моментов времени уменьшение амплитуды колебаний со временем описывается гауссовской функцией, а на больших временах затухание становится экспоненциальным. Чем больше $\varepsilon = l/R$, тем позже происходит переход от гауссовского к экспоненциальному режиму. Проведено сравнение решения интегро-дифференциального уравнения с результатами прямого

численного моделирования на основании полной системы линеаризованных уравнений идеальной магнитной гидродинамики. Совпадение результатов, полученных двумя методами, найдено достаточно хорошим.

Время затухания определяется условием, что амплитуда колебаний убывает в e раз. Это время рассчитывается с помощью решения интегро-дифференциального уравнения и затем сравнивается со временем, полученным на основании классической теории резонансного затухания. Найдено, что классическая теория недооценивает время затухания, причём ошибка возрастает с ростом ε . Однако эта ошибка не слишком велика. Даже при $\varepsilon = 0,3$, что является наибольшим значением, рассмотренным в главе 2.4, ошибка составляет только 18 %. Таким образом, время затухания, вычисленное на основе классической теории резонансного затухания, может быть использовано как достаточно хорошая аппроксимация реального времени затухания. Результаты этой главы опубликованы в работе [Ruderman, Terradas, 2013].

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Выведено уравнение, описывающее изгибные волны в тонкой магнитной трубке с плотностью и радиусом поперечного сечения, изменяющимися вдоль трубки. Это уравнение использовано для исследования безотражательного распространения изгибных волн вдоль корональных петель. Оно также использовано для исследования влияния на собственные частоты стоячих волн в корональных петлях. Результаты этого исследования применяются в корональной сейсмологии. Показано, что учёт расширения корональной петли приводит к уменьшению оценки шкалы высот, полученной на основе одновременного наблюдения фундаментальной моды и первого обертона изгибных колебаний.
2. Выведено уравнение, описывающее распространение нелинейных изгибных волн с учётом резонансного затухания. Показано, что нелинейность может существенно увеличивать эффективность резонансного затухания.
3. Исследованы стоячие изгибные волны в магнитных трубках с эллиптическим сечением. Показано, что в этом случае имеются две фундаментальные моды с разными собственными

частотами. Обе моды линейно поляризованы, одна вдоль большой оси эллиптического сечения, а другая — вдоль малой. Аналогичные результаты получены для каждого обертона.

4. Исследованы вертикальные и горизонтальные колебания плоской магнитной трубки с сечением, изменяющимся вдоль трубки. Показано, что в общем случае фундаментальные моды этих колебаний имеют разные частоты. Аналогичные результаты получены для каждого обертона.
5. Исследованы изгибные колебания неплоских магнитных трубок. Показано, что направление поляризации линейно поляризованной волны изменяется вдоль трубки таким образом, что угол между направлением поляризации и направлением главной нормали к оси петли остаётся постоянным. Получен критерий, позволяющий определить, является ли наличие узла в наблюдаемых поперечных колебаниях эффектом проекции, или оно свидетельствует о том, что наблюдалась не фундаментальная мода, а первый обертон.
6. Исследованы коллективные колебания двух параллельных магнитных трубок. Показано, что взаимодействие между трубками уменьшает резонансное затухание колебаний. Также показано, что оценка шкалы высот, полученная с помощью одновременного наблюдения фундаментальной моды и первого обертона колебаний системы двух параллельных трубок, совпадает с оценкой, полученной на основе наблюдений колебаний уединённой трубки.
7. Исследованы изгибные колебания магнитной трубки в присутствии течения. Показано, что при типичных наблюдаемых скоростях течений влияние течения на оценку шкалы высот мало.
8. Решена начальная задача для изгибных колебаний магнитной трубки, возбуждаемых произвольным возмущением. Показано, что после переходного периода с длительностью порядка одного периода фундаментальной моды, движение трубки описывается фундаментальной модой колебаний. В приближении тонкого переходного слоя исследовано резонансное затухание этой моды. Предложен метод оценки поперечной структуры корональной петли на основе наблюдений затухания её поперечных колебаний.
9. Исследовано влияние изменения плотности вдоль магнитной трубки на эффективность резонансного затухания

её изгибных колебаний. Показано, что в предположении однородной стратификации, означаемом, что отношение плотности вне и внутри трубки постоянно, а отношение плотности в переходном слое к плотности внутри трубки зависит только от радиальной координаты, отношение времени затухания к периоду фундаментальной моды не зависит от стратификации.

10. Исследованы изгибные колебания охлаждающихся корональных петель. Показано, что охлаждение приводит к увеличению амплитуды колебаний. Этот эффект может компенсировать резонансное затухание, что приводит к возможности существования незатухающих колебаний.

Цитируемая литература

- [Рютов, Рютова, 1976] *Рютов Д.Д., Рютова М.П.*, Звуковые колебания в плазме с магнитными филаментами // Журн. экспериментальной и теоретической физики. 1976. Т. 70. С. 943–954.
- [Andries et al., 2005] *Andries J., Arregui I., Goossens M.* Determination of the coronal density stratification from the observation of harmonic coronal loop oscillations // *Astrophys. J.* 2005. V. 624. P. L57–L60.
- [Andries et al., 2009] *Andries J., Van Doorsselaere T., Roberts B., Verth G., Verwichte E., Erdelyi R.* Coronal seismology by means of kink oscillation overtones // *Space Sci. Rev.* 2009. V. 149. P. 3–29.
- [Arregui, Ballester, 2011] *Arregui I., Ballester J.-L.* Damping mechanisms for oscillations in solar prominences // *Space Sci. Rev.* 2011. V. 158. P. 169–204.
- [Arregui et al., 2012] *Arregui I., Oliver R., Ballester J.-L.* Prominence Oscillations // *Living Rev. Solar Phys.* 2012. V. 9. A2.
- [Aschwanden, 2009] *Aschwanden M.J.* The 3D geometry, motion, and hydrodynamic aspects of oscillating coronal loops // *Space Sci. Rev.* 2009. V. 149. P. 31–64.
- [Aschwanden, Schrijver, 2011] *Aschwanden M.J., Schrijver C.J.* Coronal loop oscillations observed with atmospheric imaging assembly — kink mode with cross-section and density oscillations // *Astrophys. J.* 2011. V. 736. A102.
- [Aschwanden, Terradas, 2008] *Aschwanden M.J., Terradas J.* The effect of radiative cooling on coronal loop oscillations // *Astrophys. J.* 2008. V. 686. P. L127–L130.

- [Aschwanden et al., 1999] *Aschwanden M.J., Fletcher L., Schrijver C.J., Alexander D.* Coronal loop oscillations observed with the transition region and coronal explorer // *Astrophys. J.* 1999. V. 520. P. 880–894.
- [Aschwanden et al., 2002] *Aschwanden M.J., De Pontieu B., Schrijver C.J., Tilte A.M.* Transverse oscillations in coronal loops observed with TRACE II. Measurements of geometric and physical parameters // *Solar Phys.* 2002. V. 206. P. 99–132.
- [Aschwanden et al., 2008] *Aschwanden M.J., Wulser J.P., Nitta N.V., Lemen J.R.* First three-dimensional reconstructions of coronal loops with the STEREO A and B spacecraft. I. Geometry // *Astrophys. J.* 2008. V. 679. P. 827–842.
- [Bennett et al., 1999] *Bennett K., Roberts B., Narain U.* Waves in twisted magnetic tubes // *Solar Phys.* 1999. V. 185. P. 41–59.
- [Berghmans., Clette, 1999] *Berghmans D., Clette F.* Active region EUV transient brightenings — First results by EIT of SOHO JOP80 // *Solar Phys.* 1999. V. 186. P. 207–229.
- [Cirtain et al., 2007] *Cirtain J.W., Golub L., Lundquist L., van Ballegoijen A., Savcheva A., Shimojo M., DeLuca E., Tsuneta S, Sakao T., Reeves K., Weber M., Kano R., Narukage N., Shibasaki K.* Evidence for Alfvén waves in solar X-ray jets // *Science.* 2007. V. 318. P. 1580–1582.
- [Defouw, 1976] *Defouw R.J.* Wave propagation along a magnetic tube // *Astrophys. J.* 1976. V. 209. P. 266–269.
- [De Pontieu, 2007] *De Pontieu B., McIntosh S.W., Carlsson M., Hansteen V.H., Tarbell T.D., Schrijver C.J., Title A.M., Shine R.A., Tsuneta S., Katsukawa Y., Ichimoto K., Suematsu Y., Shimizu T., Nagata S.* Chromospheric Alfvénic waves strong enough to power the solar wind // *Science.* 2007. V. 318. P. 1574–1577.
- [Edwin, Roberts, 1982] *Edwin P.M., Roberts B.* Wave propagation in a magnetically structured atmosphere. III — The slab in a magnetic environment // *Solar Phys.* 1982. V. 76. P. 239–259.
- [Edwin, Roberts, 1983] *Edwin P.M., Roberts B.* Wave propagation in a magnetic cylinder // *Solar Phys.* 1983. V. 88. P. 179–191.
- [Goossens et al., 1992] *Goossens M., Hollweg J.V., Sakurai T.* Resonant behaviour of MHD waves on magnetic-flux tubes. III. Effect of equilibrium-flow // *Solar Phys.* 1992. V. 138. P. 233–255.
- [Goossens et al., 2002] *Goossens M., Andries J., Aschwanden M.J.* Coronal loop oscillations — An interpretation in terms of resonant absorption of quasi-mode kink oscillations // *Astron. Astrophys.* 2002. V. 394. P. L39–L42.

- [He et al., 2009] *He J., Marsch E., Tu C.-Y., Tian H.* Excitation of kink waves due to small-scale magnetic reconnection in the chromosphere? // *Astrophys. J. Lett.* 2009. V. 705. P. L217–L222.
- [Hollweg, Yang, 1988] *Hollweg J. V., Yang G.* Resonance-absorption of compressible magnetohydrodynamic waves at thin surfaces // *J. Geophys. Res.* 1988. V. 93. P. 5423–5436.
- [Kjeldseth-Moe, 1998] *Kjeldseth-Moe O., Breke P.* Time Variability of Active Region Loops Observed with the Coronal Diagnostic Spectrometer (Cds) on SOHO // *Solar. Phys.* 1998. V. 182. P. 73–95.
- [Kliem et al., 2002] *Kliem B., Dammasch I. E., Curdt W., Wilhelm K.* Correlated dynamics of hot and cool plasmas in the main phase of a solar flare // *Astrophys. J.* 2002. V. 568. P. L61–L65.
- [McIntosh et al., 2011] *McIntosh S. W., De Pontieu B., Caelsson M., Hansteen V., Boemer P., Goossens M.* Alfvénic waves with sufficient energy to power the quiet solar coronal and fast solar wind // *Nature.* 2011. V. 475. P. 477–480.
- [Mok, Einaudi, 1985] *Mok Y., Einaudi G.* Resistive decay of Alfvén waves in a non-uniform plasma // *J. Plasma Phys.* 1985. V. 33. P. 199–208.
- [Morton, Erdelyi, 2009] *Morton R. J., Erdelyi R.* Transverse oscillations of a cooling coronal loop // *Astrophys. J.* 2009. V. 707. P. 750–760.
- [Morton, Erdelyi, 2010] *Morton R. J., Erdelyi R.* Application of the theory of damping of kink oscillations by radiative cooling of coronal loop plasma // *Astron. Astrophys.* 2010. V. 519. A43.
- [Nakariakov, Ofman, 2001] *Nakariakov V. M., Ofman L.* Determination of the coronal magnetic field by coronal loop oscillations // *Astron. Astrophys.* 2001. V. 372. P. L53–L56.
- [Nakariakov et al., 1999] *Nakariakov V. M., Ofman L., DeLuca E. E., Roberts B., Davila J. M.* TRACE observation of damped coronal loop oscillations: Implications for coronal heating // *Science.* 1999. V. 285. P. 862–864.
- [Okamoto et al., 2007] *Okamoto T. J., Tsuneta S., Berger T. E., Ichimoto K., Katsukawa Y., Lites B. W., Nagata S., Shibata K., Shimizu T., Shine R. A., Suematsu Y., Tarbell T. D., Title A. M.* Coronal transverse magnetohydrodynamic waves in a solar prominence // *Science.* 2007. V. 318. P. 1577–1580.
- [Pascoe et al., 2012] *Pascoe D. J., Hood A. W., De Mortel I., Wright A. N.* Spatial damping of propa41 gating kink waves due to mode coupling // *Astrophys. J.* 2012. V. 539. A37.
- [Priest, 1978] *Priest E. R.* The structure of coronal loops // *Solar. Phys.* 1978. V. 58. P. 57–87.

- [Robbrecht et al., 2001] *Robbrecht E., Verwichte E., Berghmans D., Hochedez J. F., Poedts S., Nakariakov V. M.* Slow magnetoacoustic waves in coronal loops: EIT and TRACE // *Astron. Astrophys.* 2001. V. 370. P. 591–601.
- [Roberts et al., 1984] *Roberts B., Edwin P. M., Benz A. O.* On coronal oscillations // *Astrophys. J.* 1984. V. 279. P. 857–865.
- [Roberts, 1981a] *Roberts B.* Wave propagation in a magnetically structured atmosphere. I: Surface waves on a magnetic interface // *Solar Phys.* 1981. V. 69. P. 27–38.
- [Roberts, 1981b] *Roberts B.* Wave propagation in a magnetically structured atmosphere. II: Surface waves in a magnetic slab // *Solar Phys.* 1981. V. 69. P. 39–56.
- [Rosenberg, 1970] *Rosenberg H.* Evidence for MHD pulsations in the solar corona // *Astron. Astrophys.* 1970. V. 9. P. 159–162.
- [Schrijver et al., 1997] *Schrijver C. J., Title A. M., Hagenaar H. J., Shine R. A.* Modeling the distribution of magnetic fluxes in field concentrations in a solar active region // *Solar Phys.* 1997. V. 175. P. 329–340.
- [Sedlacek, 1971] *Sedlacek Z.* Electrostatic oscillations in cold inhomogeneous plasma I. Differential equation approach // *J. Plasma Phys.* 1971. V. 5. P. 239–263.
- [Terradas, Goossens, 2012] *Terradas J., Goossens M.* Transverse kink oscillations in the presence of twist // *Astron. Astrophys.* 2012. V. 548. A112.
- [Terradas et al., 2008] *Terradas J., Arregui I., Oliver R., Ballester J. L.* Transverse oscillations of flowing prominence threads observed with Hinode // *Astrophys. J.* 2008. V. 678. P. L153–L156.
- [Tomczyk et al., 2007] *Tomczyk S., McIntosh S. W., Keil S. L., Judge P. G., Schad T., Seeley D. H., Edmondson J.* Alfvén waves in the solar corona // *Science.* 2007. V. 317. P. 1192–1196.
- [Uchida, 1970] *Uchida Y.* Diagnosis of coronal magnetic structure by flare associated hydromagnetic disturbances // *Publ. Astron. Soc. Japan.* 1970. V. 22. P. 341–344.
- [Van Doorselaere et al., 2007] *Van Doorselaere T., Nakariakov V., Verwichte E.* Coronal loop seismology using multiple transverse loop oscillation harmonics // *Astron. Astrophys.* 2007. V. 473. P. 959–966.
- [Verwichte et al., 2004] *Verwichte E., Nakariakov V. M., Ofman L., Deluca E. E.* Characteristics of transverse oscillations in a coronal loop arcade // *Solar Phys.* 2004. V. 223. P. 77–94.
- [Wang, Solanki, 2004] *Wang T. J., Solanki S. K.* Vertical oscillations of a coronal loop observed by TRACE // *Astron. Astrophys.* 2004. V. 421. P. L33–L36.

- [Wang et al., 2002] *Wang T. J., Solanki S. K., Curdt W., Innes D. E., Dammasch I. E.* Doppler shift oscillations of hot solar coronal plasmas seen by SUMER: A signature of loop oscillations? // *Astrophys. J.* 2002. V. 574. P. L101–L104.
- [Winebarger et al., 2001] *Winebarger A. R., DeLuca E. E., Golub L.* Apparent flows above an active region observed with the Transition Region and Coronal Explorer // *Astrophys. J.* 2001. V. 553. P. L81–L84.
- [Winebarger et al., 2002] *Winebarger A. R., Warren H., van Ballegooijen A., DeLuca E. E., Golub L.* Steady flows detected in extreme-ultraviolet loops // *Astrophys. J.* 2002. V. 567. P. L89–L92.

Публикации автора по теме диссертации

- [Dymova, Ruderman, 2005] *Dymova M., Ruderman M. S.* Non-axisymmetric oscillations of thin prominence fibrils // *Solar Phys.* 2005. V. 229. P. 79–94.
- [Dymova, Ruderman, 2006a] *Dymova M., Ruderman M. S.* Resonantly damped oscillations of longitudinally stratified coronal loops // *Astron. and Astrophys.* 2006. V. 457. P. 1059–1070.
- [Dymova, Ruderman, 2006b] *Dymova M., Ruderman M. S.* The geometry effect on transverse oscillations of coronal loops // *Astron. and Astrophys.* 2006. V. 459. P. 241–244.
- [Goossens, Ruderman, 1995] *Goossens M., Ruderman M. S.* Conservation laws and connection formulae for resonant MHD waves // *Phys. Scripta.* 1995. V. 60. P. 171–184.
- [Goossens et al., 1995] *Goossens M., Ruderman M. S., Hollweg J. V.* Dissipative MHD solutions for resonant Alfvén waves in 1-dimensional magnetic tubes // *Solar Phys.* 1995. V. 157. P. 75–102.
- [Goossens et al., 2011] *Goossens M., Erdelyi R., Ruderman M. S.* Resonant MHD waves in the solar atmosphere // *Space Sci. Rev.* 2011. V. 158. P. 289–338.
- [Hood et al., 2013] *Hood A. W., Ruderman M., Pascoe D. J., De Mortel I., Terradas J., Wright A. N.* Damping of kink waves by mode coupling // *Astron. Astrophys.* – 2013 – V. 551, A39.
- [Morton, Ruderman, 2011] *Morton R. J., Ruderman M. S.* Kink and fluting modes of stratified coronal magnetic loops with elliptical cross-section // *Astron. Astrophys.* 2011. V. 527. A53.
- [Robertson, Ruderman, 2011] *Robertson D., Ruderman M. S.* Resonantly damped oscillations of two coronal loops // *Astron. and Astrophys.* 2011. V. 525. A4.

- [Robertson et al., 2010] *Robertson D., Ruderman M. S., Taroyan Y.* The effect of density stratification on the transverse oscillations of two parallel coronal loops // *Astron. and Astrophys.* 2010. V. 515. A33.
- [Ruderman, 1992a] *Ruderman M. S.* Long nonlinear non-axisymmetric wave propagation in a magnetic tube // *Phys. Plasmas.* 1992. V. 47. P. 175–191.
- [Ruderman, 1992b] *Ruderman M. S.* Nonlinear dissipation of surface Alfvén waves in the solar corona // *Astrophys. J.* 1992. V. 339. P. 724–732.
- [Ruderman, 1999] *Ruderman M. S.* Coronal heating by torsional Alfvén waves directly driven by footpoint motions: Harmonic driving versus stochastic driving // *Astrophys. J.* 1999. V. 521. P. 851–858.
- [Ruderman, 2003] *Ruderman M. S.* The resonant damping of oscillations of coronal loops with elliptic cross-sections // *Astron. and Astrophys.* 2003. V. 409. P. 287–297.
- [Ruderman, 2007] *Ruderman M. S.* Non-axisymmetric oscillations of thin twisted magnetic tubes // *Solar Phys.* 2007. V. 246. P. 119–131.
- [Ruderman, 2009] *Ruderman M. S.* On the vertical and horizontal transverse oscillations of curved coronal loops // *Astron. and Astrophys.* 2009. V. 506. P. 885–893.
- [Ruderman, 2010] *Ruderman M. S.* The effect of slow on transverse oscillations of coronal loops // *Solar Phys.* 2010. V. 267. P. 41–54.
- [Ruderman, 2011a] *Ruderman M. S.* Transverse oscillations of coronal loops with slowly changing density // *Solar Phys.* 2011. V. 271. P. 377–391.
- [Ruderman, 2011b] *Ruderman M. S.* Resonant damping of kink oscillations of cooling coronal magnetic loops // *Astron. Astrophys.* 2011. V. 534. A78.
- [Ruderman, Erdelyi, 2009] *Ruderman M. S., Erdelyi R.* Transverse oscillations of coronal loops // *Space Sci. Rev.* 2009. V. 149. P. 199–228.
- [Ruderman, Goossens, 1993] *Ruderman M. S., Goossens M.* Nonlinearity effect on resonant absorption of surface Alfvén waves in incompressible plasmas // *Solar Phys.* 1993. V. 143. P. 69–88.
- [Ruderman, Roberts, 2002] *Ruderman M. S., Roberts B.* The damping of coronal loop oscillations // *Astrophys. J.* 2002. V. 577. P. 475–486.
- [Ruderman, Scott, 2011] *Ruderman M. S., Scott A.* Transverse oscillations of non-planar coronal loops // *Astron. and Astrophys.* 2011. V. 529. A33.
- [Ruderman, Terradas, 2013] *Ruderman M. S., Terradas J.* Damping of coronal loop kink oscillations due to mode conversion // *Astron. and Astrophys.* 2013. V. 555. A9.

- [Ruderman, Wright, 2000] *Ruderman M. S., Wright A. N.* Nonstationary driven oscillations of a magnetic cavity // *Phys. Plasmas*. 2000. V. 7. P. 3515–3530.
- [Ruderman et al., 1995] *Ruderman M. S., Tirry W., Goossens M.* Non-stationary resonant Alfvén surface waves in one-dimensional magnetic plasmas // *J. Plasma Phys.* 1995. V. 54. P. 129–148.
- [Ruderman et al., 2000] *Ruderman M. S., Oliver R., Erdelyi R., Ballester J. L., Goossens M.* Slow surface wave damping in plasmas with anisotropic viscosity and thermal conductivity // *Astron. and Astrophys.* 2000. V. 354. P. 261–276.
- [Ruderman et al., 2008] *Ruderman M. S., Verth G., Erdelyi R.* Transverse oscillations of longitudinally stratified coronal loops with variable cross-section // *Astrophys. J.* 2008. V. 686. P. 694–700.
- [Ruderman et al., 2010] *Ruderman M. S., Goossens M., Andries J.* Nonlinear propagating kink waves in thin magnetic tubes // *Phys. Plasmas*. 2010. V. 17. 082108.
- [Ruderman et al., 2013] *Ruderman M. S., Pelinovsky E., Petrukhin N. S., Talipova T.* Non-reflective propagation of kink waves in coronal magnetic loops // *Solar Phys.* 2013. V. 286. P. 417–426.
- [Van Doorselaere et al., 2008] *Van Doorselaere T., Ruderman M. S., Robertson D.* Transverse oscillations of two parallel coronal loops // *Astron. and Astrophys.* 2008. V. 485. P. 849–857.

Содержание

Общая характеристика работы	1
Актуальность темы исследования	1
Цели и задачи диссертационной работы	4
Научная новизна работы	5
Основные положения, выносимые на защиту.	5
Достоверность результатов	6
Практическая ценность	6
Апробация	7
Публикации и личный вклад автора	8
Структура и объём диссертационной работы	8
Основное содержание диссертационной работы	8
Основные результаты и выводы диссертационного исследования	31
Цитируемая литература	33
Публикации автора по теме диссертации	37