

Российская академия наук
Сибирское отделение
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт солнечно-земной физики

На правах рукописи

УДК 523.98

Афанасьев Андрей Николаевич

**Нелинейные эффекты распространения
быстрых магнитозвуковых волн
в солнечной корональной плазме**

01.03.03 – физика Солнца

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Иркутск – 2012

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

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник
Уралов Аркадий Михайлович

Официальные оппоненты:

Бардаков Владимир Михайлович,
доктор физико-математических наук,
профессор,
профессор ФГБОУ ВПО ИрГУПС

Накаряков Валерий Михайлович,
кандидат физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник ГАО РАН

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Физический институт
им. П.Н. Лебедева Российской академии наук

Защита состоится 12 сентября 2012 г. в ____ 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, Иркутск, ул. Лермонтова, 126А, а/я 291, ИСЗФ СО РАН.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИСЗФ СО РАН

Автореферат разослан ____ 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 003.034.01
кандидат физико-математических наук



В.И. Поляков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Наступившая эра космических телескопов с высоким пространственным и временным разрешением предоставила новые возможности для детального наблюдения Солнца в различных спектральных диапазонах. Анализ наблюдений показывает, что повсеместно в солнечной короне присутствуют магнитогидродинамические волны [1, 2]. Особое внимание исследователей физики Солнца привлекает быстрая магнитозвуковая мода, поскольку она свободно распространяется как вдоль, так и поперек магнитного поля, что часто наблюдается для реальных волновых возмущений в солнечной короне. Волны Мортонa, наблюдаемые в линии $H\alpha$, и сравнительно недавно открытые в крайнем ультрафиолетовом диапазоне ЕІТ волны, распространяющиеся на значительные расстояния вдоль солнечной поверхности, с большой долей вероятности представляют собой проявления корональных быстрых магнитозвуковых ударных волн [3, 4].

Решение проблемы распространения быстрых магнитозвуковых волновых возмущений в солнечной атмосфере представляет значительный интерес. Прежде всего, это дает вклад в понимание фундаментальных магнитогидродинамических процессов, происходящих в плазменных природных средах. С другой стороны, поскольку волны Мортонa и ЕІТ волны рождаются во время эрупций в активных областях, изучение их распространения поможет прояснить вопросы, связанные с процессами формирования корональных выбросов массы и возникновения солнечных вспышек [5]. Значимость этих вопросов определяется их несомненным прикладным характером, в частности возможными геоэффективными последствиями. Эффекты кумуляции энергии быстрых магнитозвуковых волн при распространении в областях солнечной атмосферы, содержащих топологические особенности магнитного поля, являются особенно важными в связи с фундаментальной проблемой нагрева короны и возможностью возбуждения магнитного пересоединения, которое, как известно, приводит к инициации многих динамических процессов на Солнце [6, 7]. Кроме того, результаты исследования распространения быстрых магнитозвуковых волн используются для диагностики параметров плазмы, что составляет предмет бурно развивающейся в настоящее время области физики Солнца – корональной сейсмологии [8].

Начиная с пионерской работы Учиды 1968 г. [9], распространение волн Мортонa, а затем и ЕІТ волн, рассматривают в приближении линейной геометрической акустики без учета влияния амплитуды и протяженности возмущения на форму и скорость волнового фронта [10, 11]. Однако линейная теория не может объяснить замедление и уширение корональной волны в случае, когда средние параметры среды распространения неизменны вдоль солнечной поверхности, что соответствует участкам спокойного Солнца. Напротив, линейная модель Учиды предсказывает ускорение волны Мортонa, которое, как пра-

вило, не наблюдается. Указанные выше наблюдаемые особенности кинематики и эволюции распространяющихся ЕИТ волн и волн Мортонa убедительно были продемонстрированы в работах [12, 13]. Для удовлетворительного объяснения этих свойств корональной волны необходим учет ее нелинейного характера.

Учет нелинейности также оказывается существенным при рассмотрении задачи рефракции магнитозвуковых волн в окрестности магнитных нулевых точек. Магнитное поле солнечной короны практически всегда содержит нулевые точки [14], в которых величина поля обращается в нуль. При сравнительно малой скорости звука в короне происходит значительное понижение скорости распространения быстрой магнитозвуковой волны в окрестности нулевой точки, в результате чего становятся существенными эффекты рефракции волны и кумуляции ее энергии.

В последнее десятилетие был выполнен интенсивный анализ задачи рефракции магнитозвуковой волны вблизи магнитной нулевой точки [см., напр., 15–17]. Однако авторы рассматривали численно и аналитически только линейную задачу. Аналитическое исследование было проведено в лучевом приближении, причем сравнение с численным решением линеаризованной системы уравнений магнитной гидродинамики подтвердило плодотворность использования геометрической акустики. Между тем кумуляция волновой энергии вблизи нулевой точки приводит к росту интенсивности волны и ее быстрому выходу из линейного режима распространения. Неизбежная деформация волнового профиля приводит к образованию ударного разрыва, обеспечивающего наибольшую скорость поглощения плазмой энергии волны. Как проявление нелинейной обратной связи это же обстоятельство может существенно изменить картину распространения и привести к менее катастрофической рефракции быстрой магнитозвуковой волны вблизи магнитной нулевой точки, что может оказаться значимым для проблемы квазипериодических пульсаций на Солнце [18]. Поэтому представляет значительный интерес аналитический анализ нелинейных эффектов распространения быстрой магнитозвуковой волны вблизи магнитной нулевой точки.

Одним из способов учета нелинейного характера волн является метод нелинейной геометрической акустики. В своем классическом варианте этот метод содержит две независимые процедуры. В ходе первой вычисляют лучевые траектории и лучевые сечения, соответствующие линейному приближению. В ходе второй процедуры вдоль лучей рассчитываются амплитуда и протяженность нелинейной волны. Такое несамосогласованное решение весьма полезно в ряде случаев, но при этом полностью исчезают эффекты нелинейности, искажающие форму и скорость рассчитываемого волнового фронта. Самосогласованный вариант метода нелинейной геометрической акустики реализуется путем получения нелинейных лучевых уравнений, а затем совместного их решения с уравнениями, описывающими изменение интенсивности и длительности уединенной нелинейной волны вдоль луча [19]. Однако существующая к настоящему времени реализация такого самосогласованного подхода требует усовершенствования и адаптации к решаемым в диссертационной работе задачам.

Цель работы

Теоретическое исследование и математическое моделирование совместного влияния эффектов нелинейности и рефракции на распространение и эволюцию быстрых магнитозвуковых волн в неоднородной солнечной корональной плазме с использованием метода нелинейной геометрической акустики.

Основные решаемые задачи заключаются в следующем:

1. Развитие метода нелинейной геометрической акустики для исследования распространения и эволюции быстрых магнитозвуковых волн в солнечной короне.
2. Аналитическое моделирование распространения быстрых магнитозвуковых волн в спокойной солнечной короне, в активной области, а также в окрестности магнитной нулевой точки с помощью метода нелинейной геометрической акустики.
3. Выявление нелинейных эффектов распространения быстрых магнитозвуковых волн в солнечной корональной плазме.

Научная новизна

1. Впервые для моделирования быстрых магнитозвуковых ударных волн в солнечной короне использован самосогласованный метод нелинейной геометрической акустики с расчетом амплитуды волны при помощи присоединенной системы уравнений.
2. Впервые проведен аналитический расчет распространения и эволюции EIT волн и волн Мортонa с учетом нелинейного характера порождающей их корональной быстрой магнитозвуковой волны.
3. Впервые учтена нелинейность волны в задаче падения изначально плоского фронта быстрой магнитозвуковой волны на двумерную магнитную нулевую точку в холодной и теплой плазме.
4. Впервые выполнен аналитический анализ изменения амплитуды быстрой магнитозвуковой волны в задаче рефракции на двумерной магнитной нулевой точке. Для случая линейной волны в холодной плазме аналитический закон нарастания амплитуды получен в явном виде.

Научная и практическая значимость

Проведенное теоретическое исследование показывает, что при описании распространения и эволюции быстрых магнитозвуковых волн в солнечной короне необходим учет их нелинейного характера. Это позволяет количественно более точно описать кинематические и энергетические характеристики волн, выявить пути распространения и места возможной концентрации волновой энергии. Полученные результаты могут быть использованы для оценки параметров неоднородной солнечной короны, недоступных определению с помощью прямых наблюдений. Такая информация важна при задании входных ус-

ловий в задачах предсказания состояния околоземного и межпланетного пространства. В этом же аспекте является важной возможность применения результатов исследования в задаче распространения межпланетных ударных волн, а также при решении вопросов возбуждения ударных волн в нижней короне. Результаты анализа распространения крупномасштабной нелинейной быстрой магнитозвуковой волны являются полезными в контексте генерации ею потоков геоэффективных солнечных энергичных частиц, что также важно для предсказания космической погоды.

Достоверность результатов, представленных в диссертации, обеспечивается адекватным использованием математического аппарата, совпадением аналитических результатов и тестовых расчетов в предельных частных случаях с результатами, известными из литературы, а также использованием для моделирования хорошо апробированных численных схем.

Личный вклад автора заключается в участии совместно с научным руководителем в постановке задач, анализе и интерпретации полученных результатов. Автору лично принадлежат вывод теоретических зависимостей, полученных в ходе диссертационного исследования, разработка алгоритмов и компьютерных программ расчетов, а также проведение всех расчетов. Анализ наблюдательных данных, представленных в диссертации, проводился в процессе коллективной работы, в которой автор принимал непосредственное участие.

Апробация работы

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

- Community of European Solar Radio Astronomers (CESRA) Workshop «Energy storage and release through the solar activity cycle – Models meet radio observations», La Roche en Ardenne, Belgium, 15–19 June, 2010;
- 13th European Solar Physics Meeting, Rhodes, Greece, 12–16 September, 2011;
- 7-я Ежегодная конференция «Физика плазмы в солнечной системе», Москва, 6–10 февраля 2012 г.;
- Всероссийская конференция «Солнечно-земная физика», посвященная 50-летию создания ИСЗФ СО РАН, Иркутск, 28–30 июня 2010 г.;
- 5-я Ежегодная конференция «Физика плазмы в солнечной системе», Москва, 8–12 февраля 2010 г.;
- 38th Committee on Space Research (COSPAR) Scientific Assembly, Bremen, Germany, 18–25 July, 2010;
- International Workshop on Solar Physics «The Sun: from quiet to active – 2011», Moscow, Russia, August 29 – September 2, 2011;
- International Workshop «The Sun: from active to quiet. Heliophysics between two solar cycles», Moscow, Russia, 19–23 October, 2009;

- 4-я Ежегодная конференция «Физика плазмы в солнечной системе», Москва, 16–20 февраля 2009 г.;
- XII Конференция молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом» в рамках Международной Байкальской молодежной научной школы по фундаментальной физике, Иркутск, 19–24 сентября 2011 г.;
- XI Конференция молодых ученых «Гелио- и геофизические исследования» в рамках Международной Байкальской молодежной научной школы по фундаментальной физике, Иркутск, 7–12 сентября 2009 г.;

а также на научных семинарах в ИСЗФ СО РАН.

Результаты, полученные в ходе работы над диссертацией, использовались при выполнении исследований по проектам, поддержанным грантами РФФИ № 09-02-00115, № 10-02-09366, № 12-02-00037, программами Министерства образования и науки Российской Федерации по контрактам 16.518.11.7065 и 02.740.11.0576, грантом поддержки молодых ученых им. М.А. Лаврентьева СО РАН 2010–2011 гг., а также международным грантом 7-й Европейской рамочной программы международного обмена сотрудников научных учреждений им. Марии Кюри (PIRSES-GA-2011).

Основные положения, выносимые на защиту

1. Разработанный аппарат математического моделирования распространения и эволюции быстрых магнитозвуковых ударных волн в солнечной короне на основе развитого самосогласованного метода нелинейной геометрической акустики.
2. Результаты аналитического моделирования распространения и эволюции волн Мортонa и EIT волн, связанных с корональной ударной быстрой магнитозвуковой волной. Учет именно нелинейного характера порождающей корональной волны позволил получить наблюдаемые свойства волн Мортонa и EIT волн и в конкретном событии количественно описать наблюдаемую кинематику EIT волны. Проведенный анализ EIT волны в этом событии показал ее нелинейную волновую природу, а также позволил выявить, что порождающая быстрая магнитозвуковая ударная волна в данном событии распространялась в короне как взрывная волна.
3. Выявленные нелинейные особенности кумуляции энергии быстрой магнитозвуковой волны вблизи магнитной нулевой точки. Нелинейный характер быстрой магнитозвуковой ударной волны, падающей на магнитную нулевую точку, обеспечивает прохождение волны сквозь нее, ослабляя линейный эффект кумуляции волновой энергии в нулевой точке, и способствует нагреву плазмы вблизи нулевой точки из-за диссипации энергии волны в ударном фронте.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 20 работ, из них 5 – в журналах, рекомендованных ВАК для публикации результатов диссертаций.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы из 125 наименований. Общий объем диссертации 119 страниц, включая 27 рисунков.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** дана общая характеристика работы, обсуждается актуальность темы исследований, формулируются цель работы и решаемые задачи, отмечается новизна, научная и практическая значимость полученных результатов. Приведено краткое содержание диссертации и перечислены положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена развитию самосогласованного метода нелинейной геометрической акустики и разработке аппарата математического моделирования распространения и эволюции быстрых магнитозвуковых ударных волн в солнечной короне.

В параграфе 1.1 рассмотрены основные положения метода линейной геометрической акустики для расчета распространения волн в среде с магнитным полем. В этом приближении решение уравнений ищется в виде «почти плоской» волны: $A(\mathbf{r}, t)e^{i\Psi(\mathbf{r}, t)}$, где $A(\mathbf{r}, t)$ – амплитуда волны и $\Psi(\mathbf{r}, t)$ – эйконал, зависящие от координат $\mathbf{r}$ и времени t . Подставляя такое представление возмущений гидродинамических величин в волне в систему линеаризованных уравнений идеальной магнитной гидродинамики, для эйконала быстрой магнитозвуковой волны получаем уравнение в частных производных типа Гамильтона–Якоби. Решение уравнения эйконала методом характеристик дает систему лучевых уравнений, определяющих траектории распространения волны. Также линейная геометрическая акустика позволяет вычислить изменение интенсивности волны вдоль лучей на основе свойства сохранения потока энергии волны через сечение лучевой трубки. Для этого важно определить изменение величины сечения лучевой трубки при распространении волны.

В параграфе 1.2 рассмотрены вопросы, связанные с обобщением линейного лучевого метода для исследования распространения и эволюции уединенных слабых ударных волн в плавнонеоднородной среде. Такое обобщение лежит в основе метода нелинейной геометрической акустики. Нелинейный характер ударной волны проявляется, прежде всего, в том, что каждый элемент волны движется со своей собственной скоростью, приводя к деформации профиля волны. Из-за этого при распространении в однородной среде величина разрыва

на фронте уменьшается, что обусловлено диссипацией волновой энергии в ударном фронте, а длительность волны увеличивается. Изменение характеристик волны в плавнонеоднородной среде учитывается законами затухания уединенных слабых ударных волн. Для определения амплитуды и длительности ударной волны с заданным начальным профилем необходимо найти амплитуду волны в линейном приближении, изменение которой происходит только за счет расходимости фронта волны и неоднородности среды. Другая особенность ударной волны заключается в том, что скорость ее распространения превышает скорость линейной волны и определяется амплитудой. Это влияет на форму лучевых траекторий и скорость движения волнового фронта по ним, что является немаловажным, поскольку структура лучей определяет, в свою очередь, интенсивность волны. В этом смысле здесь возникает самосогласованная задача.

В зависимости от степени учета нелинейных эффектов существуют различные варианты метода нелинейной геометрической акустики. Учет только нелинейного затухания волны положен в основу часто используемой несамосогласованной реализации метода. Основная идея этого варианта заключается в том, что возмущение распространяется со скоростью линейной волны вдоль лучевых траекторий, построенных в линейном приближении; а при расчете амплитуды и других характеристик принимаются во внимание законы затухания ударных волн. В настоящей работе используется самосогласованный вариант метода нелинейной геометрической акустики, учитывающий как нелинейное затухание возмущения, так и нелинейное искажение лучей [19].

Если обозначить скачок продольной компоненты скорости плазмы на фронте волны u_{sh} , то в приближении нелинейной акустики ударная волна движется со скоростью $a + \chi u_{sh}/2$, где a – быстрая магнитозвуковая скорость в плазме, χ – числовой коэффициент порядка единицы, зависящий от направления распространения волны и соотношения между звуковой скоростью и альфвеновской. Учет такого увеличения скорости волнового фронта в лучевых уравнениях, определяющих групповую скорость волны, позволяет описать распространение слабых ударных волн. В частности, система нелинейных лучевых уравнений в декартовых координатах может быть записана в векторном виде:

$$\begin{aligned} \frac{d\mathbf{r}}{dt} &= \left(a + \frac{\chi u_{sh}}{2} \right) \frac{\mathbf{k}}{k} + k \frac{\partial a}{\partial \mathbf{k}}, \\ \frac{d\mathbf{k}}{dt} &= -k \nabla a, \end{aligned} \tag{1}$$

где $\mathbf{k}$ – вектор нормали к фронту волны, $k = |\mathbf{k}|$. В несамосогласованном методе нелинейной геометрической акустики пренебрегают слагаемым $\chi u_{sh}/2$, получая при этом из (1) систему лучевых уравнений в линейном приближении.

В заключение параграфа обсуждаются пределы применимости метода нелинейной геометрической акустики. Кроме основных допущений линейной геометрической акустики, должна быть малой нелинейность волны. Слабая

степень нелинейности возмущений характеризуется малым значением акустического числа Маха, которое представляет собой отношение величины скорости плазмы в волне к значению скорости распространения линейного возмущения в среде.

В параграфе 1.3 развита методика расчета интенсивности волны в самосогласованном методе нелинейной геометрической акустики. Сечение бесконечно узкой лучевой трубки выражается через ее объем, который, в свою очередь, может быть найден с использованием техники вычисления якобианов перехода к лучевым координатам [20] и интегрирования присоединенной системы уравнений. Эта система состоит из обыкновенных дифференциальных уравнений для функций производных от используемых координат по лучевым координатам и получается из системы лучевых уравнений линейного приближения соответствующим дифференцированием. В работе присоединенная система уравнений получена в декартовых и сферических координатах для случая распространения быстрых магнитозвуковых волн. На основе нелинейных лучевых уравнений, присоединенной системы и законов затухания ударных волн сформулирована численная схема, реализующая самосогласованный учет нелинейности волны и удобный и точный способ анализа ее интенсивности. Это позволяет моделировать распространение и эволюцию уединенных слабых ударных волн, имеющих быструю магнитозвуковую природу, в неоднородных средах. Разработанный математический аппарат предоставляет возможности для исследования поведения таких волн в солнечной короне и интерпретации волновых явлений на поверхности Солнца. Отметим, что задача расчета распространения ударной волны является весьма сложной и интегрирование уравнений возможно только численно.

Вторая глава посвящена исследованию распространения крупномасштабных быстрых магнитозвуковых ударных волн в солнечной короне. Рассмотрены результаты аналитического моделирования кинематики и эволюции волн Мортонна и EIT волн, связанных с корональной ударной волной, с использованием самосогласованного метода нелинейной геометрической акустики.

В параграфе 2.1 рассмотрены крупномасштабные быстрые магнитозвуковые волны в короне и их проявления. Особое внимание уделено волнам Мортонна, а также сравнительно недавно открытым EIT волнам. Сделан обзор основных теоретических исследований распространения волн Мортонна и EIT волн в рамках модели линейной быстрой магнитозвуковой волны, а также обсуждаются вопросы возникновения крупномасштабных волн в солнечной короне.

В параграфе 2.2 представлено моделирование нелинейных волн Мортонна и EIT волн в сферически-симметричной солнечной короне. Такой выбор модели обусловлен тем, что рассматриваемые волновые возмущения регистрируются на участках спокойного Солнца. Это также дает возможность сравнить полученные результаты моделирования с результатами рассмотрения в линейном приближении и выявить нелинейные эффекты распространения волн. Корона считается изотермической с температурой 1.5×10^6 К и скоростью звука

180 км/с. Концентрация плазмы n и ее плотность распределены по барометрическому закону с учетом изменяющейся силы тяжести с расстоянием r от центра Солнца. Магнитное поле $\mathbf{B}$ имеет только радиальную компоненту. Имеем:

$$n(r) = n_0 \exp\left(\frac{R_s}{H} \left(\frac{R_s}{r} - 1\right)\right), \quad B_r = B_0 \left(\frac{R_s}{r}\right)^2, \quad (2)$$

где $n_0 = n(R_s) = 3 \times 10^8 \text{ см}^{-3}$ – концентрация плазмы в основании короны, R_s – солнечный радиус, $H \approx 70 \text{ Мм}$ – шкала высот плотности плазмы, $B_0 = 2.3 \text{ Гс}$ – значение поля в основании короны. В модели (2) альфвеновская скорость в нижней короне увеличивается с высотой. Быстрая магнитозвуковая волна из-за рефракции распространяется вдоль сферической солнечной поверхности, порождая волну Мортонa на уровне хромосферы и EIT волну на высоте порядка H от поверхности Солнца (рис. 1).

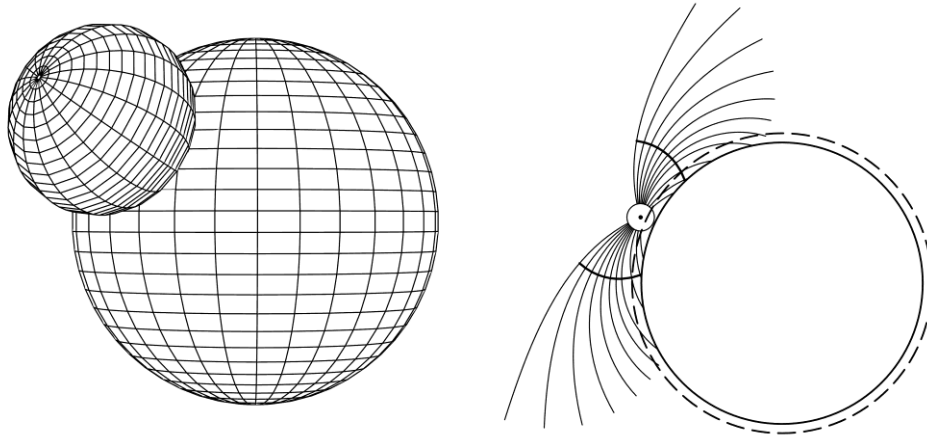


Рис. 1. Распространение быстрой магнитозвуковой волны в короне. На двумерном сечении справа приведены лучи и отрезки фронта волны, движущиеся вдоль солнечной поверхности. Штриховой линией указана высота EIT волны, равная 60 Мм. Слева показан рассчитанный трехмерный фронт корональной волны.

Проведенный аналитический расчет обнаружил замедление и затухание волн Мортонa и EIT волн на начальном участке движения, а также увеличение их длины (рис. 2). Поскольку моделирование проводилось для сферически-симметричной модели солнечной короны, замедление волн обусловлено уменьшением интенсивности порождающей корональной волны и является прямым следствием ее нелинейного характера. Это означает, что имеющие достаточную амплитуду и потому наблюдаемые реальные EIT волны и волны Мортонa будут замедляться на участках спокойного Солнца, где средние параметры среды распространения неизменны вдоль солнечной поверхности. Действительно, рассчитанные замедление и увеличение длительности волн подтверждаются результатами анализа наблюдений [12, 13]. В противоположность этому, линейные волны не обнаруживают замедления, а испытывают лишь незначительное ускорение, вызванное увеличивающимся наклоном волнового фронта к солнечной поверхности (рис. 2). Также линейное возмущение в ста-

ционарной однородной идеальной среде не изменяет свою длительность. Таким образом, сопутствующие друг другу замедление волн и увеличение их длительности указывают на принципиальную роль нелинейности в поведении ЕИТ волн и волн Мортонa.

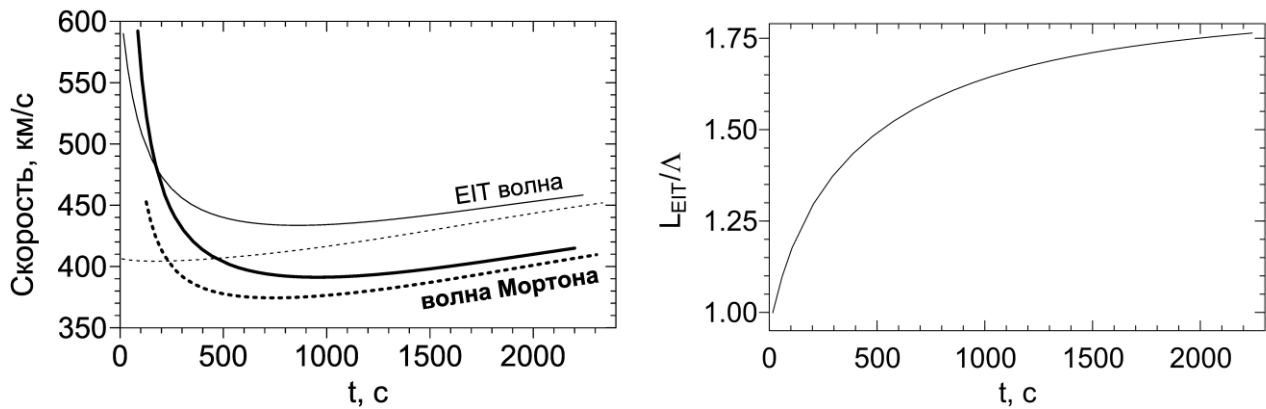


Рис. 2. Замедление ЕИТ волны и волны Мортонa (слева) и относительное удлинение ЕИТ волны (справа). Λ – начальный размер ЕИТ волны. Пунктирными линиями показаны скорости линейных волн.

В параграфе 2.3 представлены результаты моделирования распространения реальной ЕИТ волны, наблюдавшейся на Солнце в событии 17 января 2010 г. В этом событии ЕИТ волна распространялась главным образом по участкам спокойного Солнца, поэтому ее распространение вне активной области можно описать, предполагая только радиальную зависимость параметров корональной плазмы. Использовалась модель короны (2) со следующими значениями параметров: $n_0 = 4 \times 10^8 \text{ см}^{-3}$, $B_0 = 1.35 \text{ Гс}$. Альфвеновская скорость равна 170 км/с на высоте 40 Мм и растет вверх. Предполагается, что волна возникает на на-

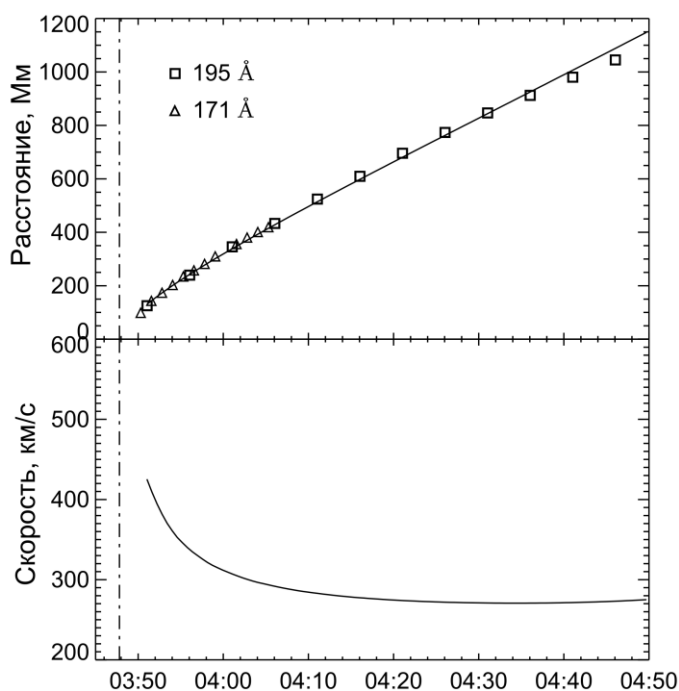


Рис. 3. Сравнение рассчитанной кинематики ЕИТ волны с данными наблюдений STEREO-B/EUVI в событии 17 января 2010 г. Квадратами обозначены положения ЕИТ волны, измеренные вдоль солнечной поверхности по данным изображений в линии 195 Å, треугольниками – в линии 171 Å. Линиями показаны результаты расчетов.

чальной сферической поверхности размером 100 Мм, внутри которой находятся активная область и источник волны, а также проходит процесс формирования ударной волны. Рассчитанная кинематика нелинейной ЕИТ волны имеет хорошее количественное согласие с наблюдениями (рис. 3).

Проведенное моделирование позволило объяснить причину несоответствия в положениях фронтов ЕИТ волны в этом событии, полученных разными исследователями для одного момента времени. Разница может быть обусловлена эффектом проекции. Если луч зрения наблюдателя проходит вдоль поверхности фронта ударной волны через уплотненный слой плазмы, то вклад в величину продольной меры эмиссии от такого слоя может быть достаточно большим, чтобы его можно было наблюдать с помощью чувствительных методик. Это приводит к появлению предшествующего ЕИТ фронта, связанного с выпуклостью фронта корональной волны (рис. 4). Представленные результаты свидетельствуют в пользу волновой природы ЕИТ волны в рассматриваемом событии.

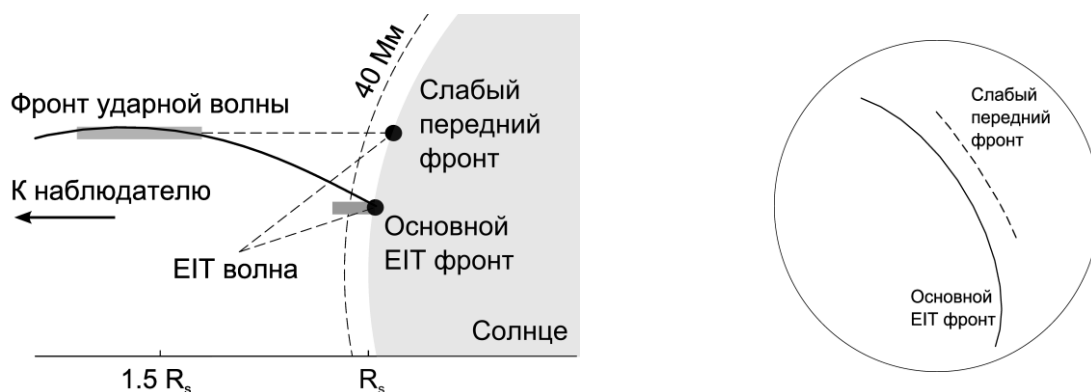


Рис. 4. Объяснение двойных фронтов ЕИТ волны в событии 17 января 2010 г. Рассчитанные положение и форма фронта корональной волны в момент времени около 04:30 UT (слева) и фронты ЕИТ волны в проекции на диск Солнца (справа).

Также было проведено моделирование распространения ударной волны вверх в корону. В такой задаче важно учесть увеличение альфвеновской скорости в активной области, где сосредоточены сильные магнитные поля, что обуславливает повышенную скорость распространения волны. Поэтому в сферически-симметричную модель магнитного поля добавлено слагаемое, соответствующее полю точечного магнитного диполя, расположенного под поверхностью Солнца. В результате моделирования было получено, что фронт волны является сплюснутым в радиальном направлении, а скорость движения волны вверх примерно в два раза выше скорости ее распространения вдоль солнечной поверхности. Рассчитанные эффекты согласуются с наблюдениями распространения корональной волны в данном событии. Важно отметить, что при их получении использовалась модель свободно распространяющейся волны без постоянного поршневого воздействия коронального выброса массы. Полученный результат обусловлен неоднородным распределением быстрой магнитозвуковой скорости в короне в присутствии активной области, а также ее крупномасштабным спадом с высотой. Хорошее согласие расчета, проведенного в рамках

модели взрывной ударной волны, с данными наблюдений поддерживает модель возбуждения корональной волны импульсной эрупцией, предложенную в [5].

В параграфе 2.4 исследуется эволюция быстрой магнитозвуковой ударной волны в магнитосфере активной области. Модель возбуждения корональной волны импульсной эрупцией предполагает возмущение умеренной интенсивности, поэтому представляет интерес проанализировать амплитудные характеристики быстрой магнитозвуковой волны на границах активной области. Высокие градиенты альфвеновской скорости могут привести к сильному увеличению интенсивности волны. С другой стороны, нелинейный характер возмущения оказывает существенное влияние на нарастание амплитуды. Модель активной области задавалась аналитически с помощью точечного магнитного диполя, расположенного под фотосферой. Параметры диполя (магнитный момент, положение) выбраны так, чтобы спад величины магнитного поля с высотой соответствовал известной модели Г. Гэри [21]. Для профиля концентрации плазмы используется классическая модель Г. Ньюкирка [22]. Анализ распространения быстрой магнитозвуковой волны в магнитосфере активной области показал, что волна распространяется в активной области асимметрично и испытывает отражение от участков сильного магнитного поля в основании активной области, что приводит к распространению энергии возмущения преимущественно вверх. Выполненный расчет амплитуды и анализ акустического числа Маха позволяют ожидать, что на границах активной области быстрое магнитозвуковое возмущение, возникшее в ходе эрупции, будет представлять собой ударную волну умеренной интенсивности.

В **третьей главе** анализируются нелинейные эффекты распространения и эволюции быстрой магнитозвуковой волны вблизи двумерной магнитной нулевой точки с помощью самосогласованного метода нелинейной геометрической акустики. Нулевая точка магнитного поля задается в декартовых координатах в виде $\mathbf{B} = (x, 0, -z)$, где подразумевается использование обезразмеренных величин. Плотность и температура плазмы считаются постоянными. Изначально плоский фронт быстрой магнитозвуковой волны падает на нулевую точку. Исследуется распространение волны в случае холодной плазмы, когда можно пренебречь давлением плазмы и считать скорость звука равной нулю, а также в случае теплой плазмы с ненулевой скоростью звука.

В параграфе 3.1 представлен краткий обзор теоретических исследований распространения быстрой магнитозвуковой волны в окрестности нулевых точек магнитного поля. Отмечается, что задача падения изначально плоского фронта волны на двумерную нулевую точку ранее изучалась только в линейном приближении.

В параграфе 3.2 рассматривается случай распространения линейной волны с использованием линейной геометрической акустики. Лучевые траектории, вдоль которых линейная волна движется в направлении нулевой точки, в приближении холодной плазмы были получены в [15]. Лучи сходятся в нулевую точку, в которой скорость распространения волны обращается в нуль. Вся энергия волны кумулируется вблизи нулевой точки и затем преобразуется в тепло в

ее малой окрестности. Геометрическая акустика позволяет получить в явном аналитическом виде закон нарастания амплитуды волны при приближении к нулевой точке в холодной плазме:

$$A(t)/A_0 = \sqrt{\frac{r_0}{z_0 t + r_0}} e^{\frac{z_0}{r_0} t}, \quad (3)$$

где x_0 и z_0 – начальные значения лучевой траектории, $r_0 = \sqrt{x_0^2 + z_0^2}$. В качестве амплитуды A выбрана величина скорости плазмы в волне, A_0 – начальное значение амплитуды. Амплитуда волны нарастает экспоненциально при приближении к нулевой точке, поэтому волна выходит из линейного режима распространения и превращается в ударную волну.

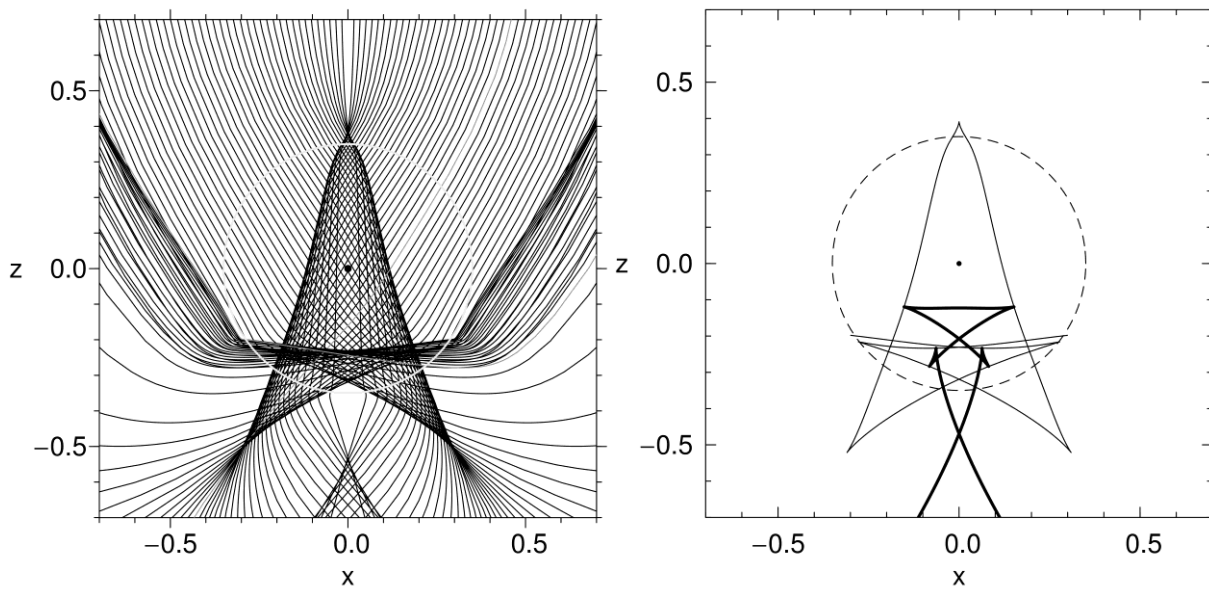


Рис. 5. Распространение линейной волны вблизи нулевой точки в теплой плазме. Слева показана лучевая картина, справа представлены каустика (тонкая линия) и волновой фронт (жирная линия). Окружность в центре показывает слой $V_A = c$. В начальный момент фронт находился при $z = 1$ и $-2 \leq x \leq 2$.

В случае распространения линейной волны в теплой плазме лучевая картина существенно усложняется. Фронт волны проходит через нулевую точку, претерпевая значительные искажения формы, что приводит к появлению каустических особенностей (рис. 5). По определению [20], каустика есть огибающая семейства лучей и поэтому может быть определена на лучевой картине по характерному сгущению лучей. Амплитуда волны на каустике стремится к бесконечности в приближении геометрической акустики, поэтому наличие каустики на лучевой картине дает важную информацию о локализации нагрева плазмы, связанного с волной. Это показывает, что, в отличие от случая холодной плазмы, нагрев рассредоточен в пространстве. Сложная форма волнового фронта легко объясняется с помощью анализа каустики, на которой происходит излом фронта волны. Также отметим, что случай холодной плазмы подразумевает

распространение волны вдали от слоя $V_A = c$, где альфвеновская скорость V_A равна скорости звука c , а случай теплой плазмы – вблизи или внутри него.

В параграфе 3.3 исследуется случай распространения ударной волны вблизи магнитной нулевой точки. На рис. 6 показана лучевая картина распространения ударной волны в холодной плазме. Нелинейный характер волны играет ключевую роль в ее распространении. Сначала, подобно линейному случаю, все лучи стремятся к нулевой точке, а фронт волны обволакивает ее. Однако вследствие нелинейности скорость распространения волны в точке не обращается в нуль и волна проходит ее, как если бы существовала малая эффективная скорость звука. Это уменьшает эффект кумуляции волновой энергии в окрестности нулевой точки. На лучевой картине снова формируется сложная каустика, на которой амплитуда волны стремится к бесконечности, указывая места нагрева плазмы.

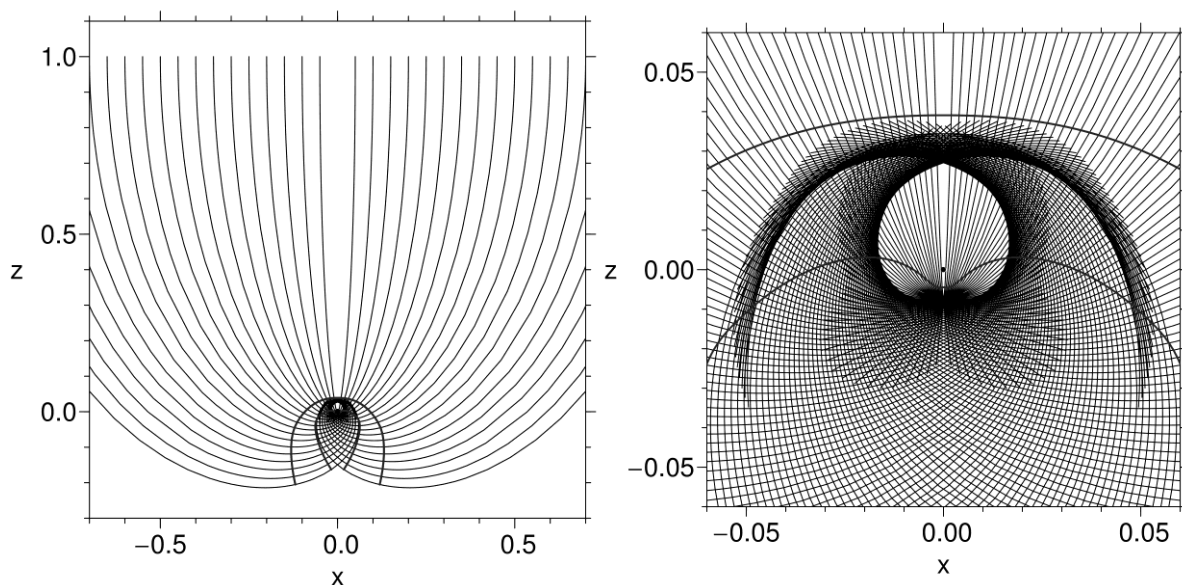


Рис. 6. Распространение ударной волны вблизи нулевой точки в холодной плазме. Сплошные линии поперек лучей показывают фронты волны в два различных момента времени. Справа показана увеличенная окрестность нулевой точки. В начальный момент плоский фронт находился при $z = 1$ и $-1 \leq x \leq 1$.

Результаты аналитического расчета эволюции амплитуды ударной волны в холодной плазме показаны на рис. 7 сплошной жирной линией. Из-за нелинейной диссипации энергии нарастание амплитуды ударной волны сначала ограничено, а затем вовсе не происходит. Также было рассчитано изменение амплитуды волны без диссипации в ударном фронте, показанное сплошной тонкой линией. Сравнение этих кривых демонстрирует, что значительная доля энергии ударной волны переходит в тепло. Поэтому, наряду с нагревом на каустике, существенный нагрев плазмы происходит вблизи нулевой точки, где трансформация энергии волны в тепло происходит наиболее эффективно. Отметим также, что, поскольку скорость волны зависит от амплитуды, части фронта, близкие к нулевой точке, начинают распространяться быстрее, формируя характер-

ную выпуклость на фронте ударной волны, видимую на рис. 6 вблизи нулевой точки. Штриховыми линиями на рис. 7 отмечено изменение продольной компоненты скорости плазмы в волне. Продольная компонента скорости осциллирует и иногда обращается в нуль, что связано с изменением угла между вектором магнитного поля и направлением луча.

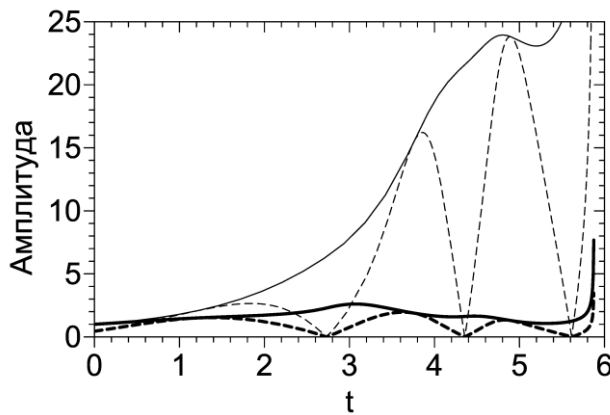


Рис. 7. Эволюция амплитуды ударной волны вдоль луча с $x_0 = 0.5$ в холодной плазме (жирные линии). Тонкие линии соответствуют изменению амплитуды волны, рассчитанному без учета диссипации в разрыве.

Также было рассмотрено распространение слабой ударной быстрой магнитозвуковой волны вблизи нулевой точки в теплой плазме. В таком случае нелинейность волны и эффект ненулевой скорости звука в плазме оказывают одинаковое по своей сути влияние на распространение волны. Ударная волна проходит через нулевую точку, так что снова формируется каустика. Соответствующая лучевая картина оказывается подобной случаю линейной волны в теплой плазме (рис. 8). Однако здесь каустика смещена в направлении падения волны, что обусловлено влиянием нелинейности на лучевые траектории.

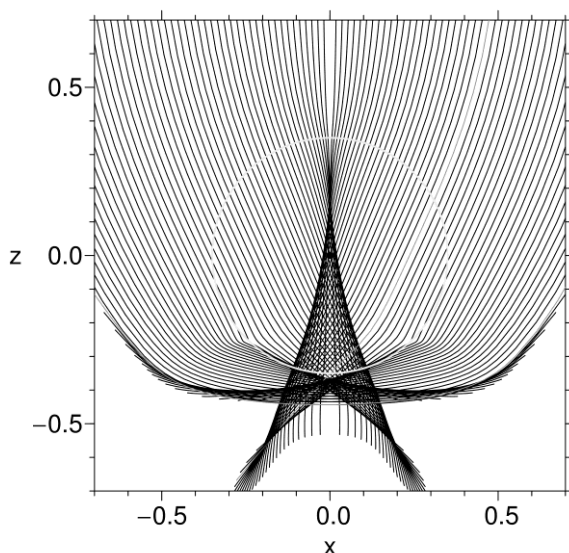


Рис. 8. Распространение ударной волны вблизи нулевой точки в теплой плазме. Окружность в центре показывает слой $V_A = c$. В начальный момент фронт находился при $z = 1$ и $-1 \leq x \leq 1$.

На рис. 9 показано жирными линиями изменение амплитуды ударной волны в теплой плазме вдоль луча с $x_0 = 0.5$. Из-за диссипации энергии в ударном фронте амплитуда волны затухает. Тонкими линиями показано изменение амплитуды волны, вычисленное в предположении отсутствия диссипации во

фронте. Как и в случае холодной плазмы, сравнение графиков указывает, что значительная часть энергии ударной волны переходит в тепло. Бесконечное увеличение амплитуды волны соответствует моменту достижения лучом каустической особенности.

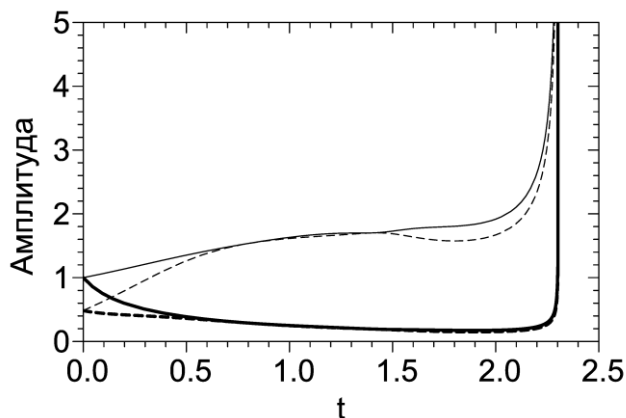


Рис. 9. Эволюция амплитуды ударной волны вдоль луча с $x_0 = 0.5$ в теплой плазме. Штриховые линии представляют изменение продольной компоненты скорости плазмы в волне, сплошные линии показывают изменение модуля скорости плазмы.

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

1. Развита самосогласованная метод нелинейной геометрической акустики для аналитического моделирования распространения и эволюции быстрых магнитозвуковых ударных волн в неоднородной среде. Для расчета амплитуды волны использована техника вычисления якобианов перехода к лучевым координатам с помощью интегрирования присоединенной системы уравнений.
2. Выполнен аналитический расчет распространения волн Мортон и ЕИТ волн, обусловленных прохождением вдоль солнечной поверхности корональной ударной волны. Выявлена определяющая роль нелинейности для кинематики и эволюции таких поверхностных возмущений. Получены замедление и затухание ЕИТ волн и волн Мортон, а также увеличение их длины, соответствующие наблюдениям.
3. Проведено моделирование ЕИТ волны в конкретном событии. Установлена нелинейная волновая природа ЕИТ волны в этом событии. Рассчитана кинематика волны и дана интерпретация наблюдаемых двойных фронтов ЕИТ волны. Показано, что корональная ударная волна в этом событии распространялась как взрывная. Получена форма фронта ударной волны, соответствующая наблюдениям, а также объяснено различие в скоростях распространения вдоль разных направлений из-за присутствия в короне активной области.
4. Изучен характер быстрого магнитозвукового возмущения, возбуждаемого эрупцией в активной области. Выявлена важная роль нелинейности в его эволюции. Показано, что на границе магнитосферы активной области возмущение может представлять собой ударную волну умеренной интенсивности.

5. Рассмотрено падение изначально плоского фронта быстрой магнитозвуковой волны на двумерную магнитную нулевую точку. Обнаружена определяющая роль нелинейности в распространении волны вблизи нулевой точки. Аналитический расчет показал, что нелинейность приводит к распространению волны через нулевую точку даже в случае холодной плазмы, уменьшая эффект кумуляции волновой энергии в нулевой точке. Выявлено, что вокруг нулевой точки формируется сложная каустическая особенность, на которой амплитуда волны значительно возрастает. Обусловленный этим нагрев плазмы рассредоточен в пространстве вокруг нулевой точки.
6. Выполнен аналитический расчет амплитуды волны в задаче рефракции быстрой магнитозвуковой волны вблизи двумерной магнитной нулевой точки. Показано, что линейное возмущение неизбежно превращается в ударную волну при приближении к нулевой точке, тогда как амплитуда ударной волны при этом не возрастает. Получено, что существенный нагрев плазмы возникает также вне каустики в окрестности нулевой точки из-за сильного нелинейного затухания волны.

Публикации автора по теме диссертации:

1. Afanasyev A.N., Uralov A.M. Coronal shock waves, EUV waves, and their relation to CMEs. II. Modeling MHD shock wave propagation along the solar surface, using nonlinear geometrical acoustics // *Solar Phys.* 2011. V. 273. P. 479–491.
2. Afanasyev A.N., Uralov A.M. Modelling the propagation of a weak fast-mode MHD shock wave near a 2D magnetic null point, using nonlinear geometrical acoustics // *Solar Phys.* 2012. DOI: 10.1007/s11207-012-0022-9.
3. Grechnev V.V., Afanasyev A.N., Uralov A.M., Chertok I.M., Eselevich M.V., Eselevich V.G., Rudenko G.V., Kubo Y. Coronal shock waves, EUV waves, and their relation to CMEs. III. Shock-associated CME/EUV wave in an event with a two-component EUV transient // *Solar Phys.* 2011. V. 273. P. 461–477.
4. Grechnev V.V., Uralov A.M., Chertok I.M., Kuzmenko I.V., Afanasyev A.N., Meshalkina N.S., Kalashnikov S.S., Kubo Y. Coronal shock waves, EUV waves, and their relation to CMEs. I. Reconciliation of “EIT waves”, type II radio bursts, and leading edges of CMEs // *Solar Phys.* 2011. V. 273. P. 433–460.
5. Afanasyev A.N., Uralov A.M., Grechnev V.V. Using the nonlinear geometrical acoustics method in the problem of Moreton and EUV wave propagation in the solar corona // *Geomag.&Aeronomy.* 2011. V. 51. P. 1015–1023.
6. Афанасьев А.Н., Уралов А.М., Гречнев В.В. Распространение слабых МГД ударных волн в солнечной короне // Труды XI Конф. молодых ученых «Гелио- и геофизические исследования». БШФФ-2009. Иркутск, 2009. С. 229–231.
7. Афанасьев А.Н. Особенности распространения быстрой магнитозвуковой волны вблизи магнитной нулевой точки // Труды XII Конф. молодых уче-

ных «Взаимодействие полей и излучения с веществом». БШФФ-2011. Иркутск, 2011. С. 53–55.

8. Афанасьев А.Н., Уралов А.М., Гречнев В.В. Использование метода нелинейной геометрической акустики в задаче о распространении волн Мортонна и EUV-волн в солнечной короне // Солнечно-земная физика. 2011. Вып. 17. С. 3–10.
9. Afanasyev A.N., Uralov A.M. Propagation of a nonlinear fast-mode MHD wave near a magnetic null point // «13th European Solar Physics Meeting. Programme and Abstract Book»: Electronic Publication. Rhodes (Greece), 2011. P. 111. http://astro.academyofathens.gr/espm13/documents/ESPM13_abstract_programme_book.pdf.
10. Afanasyev A., Uralov A., Grechnev V. Modeling the propagation of shock-associated EUV waves // «CESRA 2010. Scientific Program & Abstracts»: Electronic Publication. La Roche en Ardenne (Belgium), 2010. P. 87.
11. Grechnev V., Uralov A., Afanasyev A., Chertok I., Kubo Y. On a relation between shock-associated EIT waves and type II radio bursts // «CESRA 2010. Scientific Program & Abstracts»: Electronic Publication. La Roche en Ardenne (Belgium), 2010. P. 89.
12. Grechnev V., Uralov A., Chertok I., Afanasyev A. On the onset and propagation of CMEs and associated coronal waves // «38th COSPAR Scientific Assembly 2010 Abstracts»: Electronic Publication; CD. Bremen (Germany), 2010. D22-0008-10. <http://www.cospar-assembly.org/uploads/documents/AbstractCD-2010.iso>.
13. Афанасьев А.Н., Уралов А.М., Гречнев В.В. Нелинейные эффекты распространения быстрых магнитозвуковых волн в солнечной короне // Сб. тез. 7-й Ежегодной конференции «Физика плазмы в Солнечной системе»: электронное издание; CD. Москва, 2012. С. 3. <http://plasma2012.cosmos.ru/files/conf-plasma7-iki-feb2012.pdf>.
14. Афанасьев А.Н., Уралов А.М. Моделирование распространения быстрых магнитозвуковых волн в активной области // Сб. тез. 7-й Ежегодной конференции «Физика плазмы в солнечной системе»: электронное издание; CD. Москва, 2012. С. 25. <http://plasma2012.cosmos.ru/files/conf-plasma7-iki-feb2012.pdf>.
15. Афанасьев А.Н., Уралов А.М., Гречнев В.В. Моделирование распространения магнитогидродинамических корональных волн // Сб. тез. 5-й Ежегодной конференции «Физика плазмы в солнечной системе»: электронное издание; CD. Москва, 2010. С. 95. <http://solarwind.cosmos.ru/txt/conf2010-thesis.pdf>.
16. Гречнев В.В., Уралов А.М., Черток И.М., Афанасьев А.Н. О возникновении и распространении корональных выбросов и связанных с ними корональных волн // Программа и тез. Всероссийск. конф. «Солнечно-земная физика», посвященной 50-летию создания ИСЗФ СО РАН. Иркутск, 2010. С. 12.

17. Grechnev V., Uralov A., Afanasyev A., Chertok I., Kuzmenko I. An up-to-date view on the origin and relations between solar eruptions, CMEs, and associated waves // International Workshop Proc. «The Sun: from quiet to active – 2011». Moscow, 2011. P. 17.
18. Grechnev V., Uralov A., Chertok I., Afanasyev A. The onset and propagation of CMEs and coronal waves // International Workshop Proc. «The Sun: from active to quiet». Moscow, 2009. P. 37.
19. Уралов А.М., Гречнев В.В., Афанасьев А.Н., Черток И.М. Применение автоматического подхода к описанию кинематики солнечных корональных выбросов // Сб. тез. 4-й Ежегодной конференции «Физика плазмы в солнечной системе»: электронное издание. Москва, 2009. С. 29. <http://solarwind.cosmos.ru/txt/2009/conf2009thesis.pdf>.
20. Гречнев В.В., Уралов А.М., Черток И.М., Афанасьев А.Н. Наблюдения возникновения и распространения корональных волн // Сб. тез. 4-й Ежегодной конференции «Физика плазмы в солнечной системе»: электронное издание. Москва, 2009. С. 15. <http://solarwind.cosmos.ru/txt/2009/conf2009thesis.pdf>.

ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Nakariakov V.M., Verwichte E. Coronal waves and oscillations // Living Rev. Solar Phys. 2005. V. 2. № 3. <http://www.livingreviews.org/lrsp-2005-3>.
2. Vršnak B., Cliver E.W. Origin of coronal shock waves // Solar Phys. 2008. V. 253. P. 215–235.
3. Warmuth A. Large-scale waves and shocks in the solar corona // The high energy solar corona: waves, eruptions, particles / Eds. Klein K.-L., MacKinnon A.L. Berlin: Springer Verlag, 2007. 284 p. (Lect. Notes Phys. 2007. V. 725. P. 107–138.)
4. Zhukov A.N. EIT wave observations and modeling in the STEREO era // J. Atm. Solar-Terrest. Phys. 2011. V. 73. P. 1096–1116.
5. Grechnev V.V., Uralov A.M., Slemzin V.A., Chertok I.M., Kuzmenko I.V., Shibasaki K. Absorption phenomena and a probable blast wave in the 13 July 2004 eruptive event // Solar Phys. 2008. V. 253. P. 263–290.
6. Сыроватский С.И. Динамическая диссипация магнитной энергии в окрестности нейтральной линии магнитного поля // Журн. эксперим. теоретич. физики. 1966. Т. 50. С. 1133–1147.
7. Буланов С.В., Сыроватский С.И. Магнитогидродинамические колебания и волны в окрестности нулевой линии магнитного поля // Физика плазмы. 1980. Т. 6. С. 1205–1218.
8. Nakariakov V.M., Verwichte E. Seismology of the corona of the Sun // Astron. Geophys. 2004. V. 45. P. 4.26–4.27.
9. Uchida Y. Propagation of hydromagnetic disturbances in the solar corona and Moreton's wave phenomenon // Solar Phys. 1968. V. 4. P. 30–44.

10. Wang Y.-M. EIT waves and fast-mode propagation in the solar corona // *Astrophys. J.* 2000. V. 543. P. L89–L93.
11. Patsourakos S., Vourlidas A., Wang Y.M., Stenborg G., Thernisien A. What is the nature of EUV waves? First STEREO 3D observations and comparison with theoretical models // *Solar Phys.* 2009. V. 259. P. 49–71.
12. Warmuth A., Vršnak B., Aurass H., Hanslmeier A. Evolution of two EIT/H α Moreton waves // *Astrophys. J.* 2001. V. 560. P. L105–L109.
13. Warmuth A., Vršnak B., Magdalenic J., Hanslmeier A., Otruba W. A multiwavelength study of solar flare waves: I. Observations and basic properties // *Astron. Astrophys.* 2004. V. 418. P. 1101–1115.
14. McLaughlin J.A., Hood A.W., De Moortel I. Review article: MHD wave propagation near coronal null points of magnetic fields // *Space Sci. Rev.* 2011. V. 158. P. 205–236.
15. McLaughlin J.A., Hood A.W. MHD wave propagation in the neighbourhood of a two-dimensional null point // *Astron. Astrophys.* 2004. V. 420. P. 1129–1140.
16. McLaughlin J.A., Hood A.W. MHD mode coupling in the neighbourhood of a 2D null point // *Astron. Astrophys.* 2006. V. 459. P. 641–649.
17. McLaughlin J.A., Ferguson J.S.L., Hood A.W. 3D MHD coronal oscillations about a magnetic null point: Application of WKB theory // *Solar Phys.* 2008. V. 251. P. 563–587.
18. Nakariakov V.M., Melnikov V.F. Quasi-periodic pulsations in solar flares // *Space Sci. Rev.* 2009. V. 149. P. 119–151.
19. Uralova S.V., Uralov A.M. WKB approach to the problem of MHD shock propagation through the heliospheric current sheet // *Solar Phys.* 1994. V. 152. P. 457–479.
20. Кравцов Ю.А., Орлов Ю.И. Геометрическая оптика неоднородных сред. М.: Наука. 1980. 304 с.
21. Gary G.A. Plasma beta above the solar active region: Rethinking the paradigm // *Solar Phys.* 2001. V. 203. P. 71–86.
22. Newkirk G.Jr. The solar corona in active regions and the thermal origin of the slowly varying component of solar radio radiation // *Astrophys. J.* 1961. V. 133. P. 983–1013.

Отпечатано в издательском отделе
ИСЗФ СО РАН
Заказ № 130 от 31 мая 2012 г.
Объем 23 с.
Тираж 150 экз.