

На правах рукописи

ЦАП Юрий Теодорович

**ПЛАЗМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ В МАГНИТНЫХ
СТРУКТУРАХ АТМОСФЕР СОЛНЦА И
ВСПЫХИВАЮЩИХ ЗВЕЗД**

Специальность 01.03.02 — астрофизика и радиоастрономия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико–математических наук

Санкт–Петербург
2008

Работа выполнена в НИИ "Крымская астрофизическая обсерватория" Министерства образования и науки Украины, Главной (Пулковской) астрономической обсерватории Российской академии наук

Научный консультант: доктор физико–математических наук
СТЕПАНОВ Александр Владимирович

Официальные оппоненты: доктор физико–математических наук
БЕСПАЛОВ Петр Алексеевич
доктор физико–математических наук
ФОМИЧЕВ Валерий Викторович
доктор физико–математических наук
ЯСНОВ Леонид Васильевич

Ведущая организация: Физико–технический институт РАН им. А.Ф. Иоффе

Защита состоится " _____ " _____ 2008 г. в _____ на заседании диссертационного совета Д 002.120.01 по защите диссертаций на соискание ученой степени доктора физико–математических наук при Главной (Пулковской) астрономической обсерватории Российской академии наук по адресу: 196140, Санкт–Петербург, Пулковское шоссе, 65/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГАО РАН.

Автореферат разослан " _____ " _____ 2008 г.



Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат физико–математических наук

Е. В. Милецкий

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Введение

Как известно, 99% барионного вещества Вселенной состоит из плазмы. Атмосферы звезд, излучение которых служит единственным источником информации об их строении и динамике, пронизаны магнитными полями, играющими ключевую роль во многих космических явлениях. Поэтому неудивительно, что методы физики плазмы находят самое широкое применение в астрономии на протяжении последних десятилетий.

Среди различных космических тел особое место принадлежит Солнцу (G2V) и красным карликам. Солнце является ближайшей звездой и его по праву можно назвать розеттским камнем астрофизики, служащим по образному выражению Паркера "воротами к звездам". В свою очередь, согласно каталогу SDSS (Sloan Digital Sky Survey), из 8000 звездных объектов в окрестности Солнца около 75% относятся к красным карликам, среди которых более 50% звезд спектрального класса M_4 – M_9 обнаруживают высокий уровень магнитной активности [1*].

К настоящему времени получено много указаний, свидетельствующих о единой природе энерговыделения на Солнце и вспыхивающих звездах. Считается, что вспышки возникают из-за развития магнитогидродинамических (МГД) и кинетических неустойчивостей в одной или нескольких корональных арках, тогда как магнитные трубки служат каналами, через которые происходит перенос энергии конвективных движений плазмы из фотосферы в верхние слои атмосфер. Диссертация посвящена изучению плазменных процессов в таких магнитных структурах на Солнце и вспыхивающих звездах.

Актуальность работы

Несмотря на армаду космических лабораторий и крупных наземных телескопов, физическая природа многих солнечных и звездных явлений остается до конца не выясненной. Среди нерешенных фундаментальных проблем одними из наиболее актуальных являются проблемы вспышечного энерговыделения и нагрева корональной плазмы. До сих пор не совсем ясно, каким образом происходит трансформация свободной энергии магнитного поля в тепловую и энергию ускоренных частиц. Все еще вызывает много споров вопрос об источниках нагрева корон Солнца и звезд.

Существенный вклад в решение этих задач может внести бурно развивающееся с конца 90-х годов новое перспективное направление исследований, названное корональной сейсмологией. МГД волны и колебания в солнечной и звездных коронах привлекают внимание многих исследователей на протя-

жении более чем 70 лет, начиная с пионерских работ Дизона [2*], обнаружившего пульсации солнечного протуберанца, а также Альвена [3*], Бирмана [4*] и Шварцшильда [5*], независимо друг от друга выдвинувших гипотезу о волновом нагреве корональной плазмы Солнца. Однако лишь сравнительно недавно благодаря совершенствованию космических технологий, улучшению чувствительности приемников излучения и пространственного разрешения телескопов, появилась возможность непосредственных наблюдений МГД пульсаций в магнитных структурах верхней атмосферы Солнца.

За последнее время, хотя и удалось достигнуть заметного прогресса в наблюдательной корональной сейсмологии, тем не менее, мало уделялось внимания разработке методов диагностики плазмы и магнитных полей на основе короткопериодических осцилляций вспышечного излучения, значения периодов которых в солнечной короне составляют 1–10 с. В значительной мере это связано с тем, что, согласно широко цитируемой работе Робертса и др. [6*], быстрые магнитозвуковые (БМЗ) моды типа перетяжек (радиальные моды) могут возбуждаться лишь в сравнительно толстых корональных петлях, когда их длина L сравнима с радиусом сечения a . Между тем, как показали Зайцев и Степанов [7*], такой вывод нельзя считать обоснованным, поскольку излучающие радиальные БМЗ моды существуют и в тонких арках ($L \gg a$), характерных, в частности, для Солнца.

Актуальность изучения короткопериодических пульсаций излучения обусловлена еще и тем, что в настоящее время активно дискутируется вопрос о параметрах петель в коронах вспыхивающих звезд. Как правило, для оценки их длин, концентрации и температуры плазмы обычно исходят из размерностных соотношений, следующих из уравнения теплового баланса. Но такой подход требует не всегда обоснованных предположений, что зачастую приводит к противоречивым результатам. Поэтому необходимо привлечение иных независимых методов диагностики.

Помимо колебаний в магнитных структурах могут также возбуждаться различные МГД неустойчивости, с которыми связывают многие нестационарные явления в атмосферах Солнца и звезд. Однако в большинстве работ на эту тему корональную арку представляют в виде идеализированного прямого плазменного цилиндра. Вместе с тем учет кривизны петель, а также воздействия внешних сил может существенно сказаться на конечных результатах и привести к появлению нового класса баллонных неустойчивостей — колебательных (overstability).

В настоящее время считается, что шлемовидные магнитные структуры играют важную роль в происхождении солнечных вспышек. Причем в ходе

вспышечного энерговыделения над вершинами петель наблюдаются плотные и горячие выбросы плазмы (плазмоиды, блобы), которые для импульсных событий никак не связаны с эрупцией ниже расположенного магнитного жгута [8*,9*]. На наш взгляд, их происхождение может быть связано с отрывом от вершины петли плазменного "языка", образующегося в результате развития баллонной неустойчивости. Однако убедительных свидетельств в пользу данной гипотезы до сих пор получено не было.

Ускоренные во вспышке электроны и протоны генерируют различные плазменные волны, которые могут оказывать определяющее влияние на распространение заряженных частиц в корональных арках (пробкотронах). Тем не менее, часто полагают, что диффузия электронов в конус потерь определяется кулоновскими столкновениями [10*]. Это и не удивительно, так как вплоть до последнего времени убедительных наблюдательных данных, свидетельствующих о доминирующей роли плазменных волн в динамике и эволюции энергичных электронов корональных арок, не существовало. Лишь недавно с помощью радиогелиографа Нобейма удалось разрешить движущийся вдоль корональной арки с аномально низкой скоростью нетепловой источник [11*]. Поскольку излучение на 17 и 34 ГГц определяется электронами релятивистских энергий, то объяснение, предложенное Степановым и др. [11*], состояло в том, что данное необычное явление обусловлено сильной пичч-угловой диффузией высокоэнергичных электронов на свистах, замедляющей поток частиц [12*]. Вместе с тем детальный анализ инкрементов возбуждения волн с учетом релятивистских поправок в условиях корональных арок не проводился.

С появлением динамических солнечных спектрографов сантиметрового диапазона обнаружилось богатство тонкой спектрально-временной структуры излучения вспышек. В частности, на станции Хуайроу (Китай) наблюдалось более 30 полос в зебра-структуре [13*], которые не проявляются в таком большом количестве на метровых волнах. Это требует дополнительных исследований генерации плазменных волн в арках ускоренными электронами с характерным степенным распределением по энергиям.

Мелкомасштабные волны способны также влиять на распространение низкоэнергичных ($\lesssim 1$ МэВ) протонов, которые могут содержать значительную часть энергии солнечных и звездных вспышек. Поэтому не следует исключать, что альвеновская турбулентность определяет наблюдаемые особенности ударной поляризации в линии $\text{H}\alpha$. Важность подобных исследований трудно переоценить, поскольку вклад низкоэнергичных протонов в жесткое излучение вспышек пренебрежимо мал.

Считается, что за нагрев корон Солнца и звезд, вероятнее всего, ответственны либо альвеновские волны, генерируемые в фотосфере конвективными движениями, либо нано- и микровспышки (элементарные вспышечные события), обусловленные многочисленными мелкомасштабными пересоединениями магнитных силовых линий [14*]. Обе гипотезы встречаются с теми или иными трудностями. Так, согласно наблюдениям в различных волновых диапазонах [14*], частота элементарных вспышечных событий слишком мала. Между тем альвеновские волны подвержены сильному отражению в переходном слое между хромосферой и короной [15*], а также могут испытывать значительные энергетические потери при увеличении их амплитуды. Отсюда возникает необходимость в дополнительных исследованиях причин нагрева корон.

Основные цели диссертации

1. Проанализировать дисперсионное уравнение МГД колебаний корональных петель и определить декремент их акустического затухания.
2. Найти условия возникновения баллонной неустойчивости во вспышечных петлях с учетом кривизны магнитных силовых линий.
3. Изучить особенности возбуждения собственных мод колебаний в корональных петлях с "вмороженными" основаниями.
4. Исследовать модуляцию излучения тепловой и нетепловой природы МГД колебаниями в магнитных структурах атмосфер Солнца и вспыхивающих звезд.
5. Выяснить механизмы диссипации МГД волн в условиях солнечной и звездных корон.
6. Разработать новые методы корональной сейсмологии для диагностики плазмы и магнитных полей в областях вспышечного энерговыделения Солнца и активных красных карликов.
7. Провести сравнительный анализ инкрементов неустойчивостей свистов и электростатических волн, генерируемых релятивистскими электронами в корональных арках.
8. Рассмотреть механизм возбуждения верхнегибридных волн на двойном плазменном резонансе энергичными электронами с конусом потерь и степенным распределением по энергиям.

9. Исследовать эффективность рассеяния пучка низкоэнергичных протонов на мелкомасштабных альвеновских волнах в области вспышечного $H\alpha$ -излучения на Солнце.
10. Проанализировать особенности распространения волн альвеновского типа в стратифицированных атмосферах с учетом тонкой структуры магнитного поля.
11. На основе микроволновых наблюдений попытаться обнаружить альвеновские волны и элементарные вспышечные события в солнечных активных областях, а также выяснить их роль в нагреве атмосфер Солнца и звезд.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Период излучающих радиальных колебаний магнитной трубки определяется радиусом сечения, а не ее длиной. Акустическое затухание таких колебаний играет важную роль и зависит от отношения плотностей внутри и снаружи петли.
2. Корональная сейсмология — эффективный метод диагностики плазмы и магнитных полей Солнца и звезд.
3. Изгибные колебания вспышечных петель раскачивают баллонную неустойчивость при малых значениях плазменного параметра бета.
4. Свисты оказывают доминирующее влияние на распространение релятивистских электронов в корональных арках.
5. За генерацию многополосной зебра-структуры в микроволновом излучении Солнца ответственна конусная неустойчивость верхнегибридных волн на двойном плазменном резонансе.
6. Альвеновская турбулентность возбуждается потоками низкоэнергичных протонов в верхней хромосфере Солнца, вызывая деполяризацию $H\alpha$ -излучения солнечных вспышек.
7. Поперечные и особенно крутильные моды с периодами 10 — 40 с, генерируемые на уровне фотосферы конвективными движениями в тонких магнитных трубках, эффективно проникают в корону Солнца, обеспечивая ее нагрев.

8. Элементарные вспышечные события играют важную роль в нагреве плазмы солнечных активных областей.

Научная новизна

1. Предложены новые аналитические и численные методы расчета декремента акустического затухания МГД осцилляций корональных арок.
2. Доказано, что период излучающих радиальных колебаний магнитной трубки определяется радиусом сечения, а не ее длиной.
3. Разработаны новые методы диагностики плазмы и магнитных полей вспышечных петель по наблюдаемым пульсациям излучения Солнца и активных красных карликов в различных диапазонах длин волн.
4. Определены условия развития баллонной неустойчивости в тонких корональных петлях с учетом их кривизны.
5. Показано, что формирование племенидных структур и плазмоидов над вспышечными петлями может происходить в результате возбуждения баллонной неустойчивости изгибными колебаниями петель.
6. Сделан вывод о доминирующей роли турбулентности свистов в питч-угловой диффузии анизотропных электронов релятивистских энергий в корональных арках.
7. Установлено, что большое количество полос ($\gtrsim 30$) в динамических спектрах зебра-структуры может возникать при возбуждении верхнегибридных волн на двойном плазменном резонансе ускоренными электронами с конусом потерь и степенным распределением по энергиям.
8. Доказана возможность изотропизации потока низкоэнергичных протонов в области $H\alpha$ -излучения солнечных вспышек из-за резонансного взаимодействия частиц с мелкомасштабными альвеновскими волнами.
9. Получены свидетельства о доминирующем вкладе альвеновских волн с периодами 10 — 40 с в нагрев солнечной корональной плазмы.
10. На основе оригинальных микроволновых наблюдений установлена важная роль элементарных вспышечных событий в нагреве плазмы переходного слоя и верхней хромосферы активных областей Солнца.

Научная и практическая значимость

Предложенные в диссертации теоретические модели позволяют дать физическую интерпретацию и детальное описание плазменных процессов в магнитных структурах атмосфер Солнца и вспыхивающих звезд.

Предсказываемые наблюдательные характеристики реальных объектов и феноменов могут служить основой для диагностики параметров вспышечной плазмы. Разработанные модели процессов энерговыделения в корональных арках и нагрева корон могут быть использованы для создания физически обоснованных методов прогноза состояния околоземного космического пространства. Привлечение полученных результатов открывает возможность обоснованного планирования экспериментов для обнаружения в наблюдаемых солнечных и звездных явлениях особенностей, предсказываемых моделями.

Основные результаты опубликованы в ведущих научных журналах, трудах международных и национальных конференций, широко цитируются специалистами в области астрофизики.

Апробация работы

Результаты работы докладывались и обсуждались на семинарах НИИ "КрАО", ГАО РАН, обсерваторий Киевского национального университета и Нобеяма (Япония), университетов Глазго и Воррика (Великобритания), включая следующие научные конференции и симпозиумы:

- The 9th European Meeting on Solar Physics, September 12–18 (Florence, Italy, 1999).
- JENAM–2000, 29 мая–3 июня (Москва, 2000).
- Конференция "Солнце в максимуме активности и солнечно–звездные аналоги", 17–22 сентября (Санкт–Петербург, ГАО РАН, 2000).
- Конференции "Околоземная астрономия XXI века", 21–25 мая (Звенигород, 2001).
- Конференция "Солнечная активность и внутреннее строение Солнца", 4–9 июня (Крым, НИИ "КрАО", 2001).
- CESRA Workshop on Energy Conversion and Particle Acceleration in the Solar Corona, July 2–6 (Ringberg Castle, Germany, 2001).
- Всероссийская астрономическая конференция, 6–12 августа (Санкт–Петербург, 2001).

- Конференция "Солнечная активность и параметры ее прогноза", 3–8 июня (Крым, НИИ "КрАО", 2002).
- Международная конференция "Солнечная активность и космические лучи после смены знака полярного магнитного поля Солнца", 17–22 июня (Санкт–Петербург, ГАО РАН, 2002).
- Конференции стран СНГ и Прибалтики "Активные процессы на Солнце и звездах", 1–6 июля (Санкт–Петербург, СПбГУ, 2002).
- The 10th European Solar Physics Meeting "Solar Variability: From Core to Outer Frontiers", September 9–14 (Prague, Czech Republic, 2002).
- Вторая Украинская конференция по перспективным космическим исследованиям, 21–27 сентября (Крым, Кацивели, 2002).
- Конференция стран СНГ и Прибалтики "Актуальные проблемы физики солнечной и звездной активности", 2–7 июня (Нижний Новгород, 2003).
- Конференция памяти академика А.Б. Северного "Солнце и космическая погода", 10–14 июня (Крым, НИИ "КрАО", 2003).
- Третья Украинская конференции по перспективным космическим исследованиям, 15–19 сентября (Крым, Кацивели, 2003).
- Международный семинар "Физика Солнца и звезд", 22–24 октября (Элиста, 2003).
- Всероссийская астрономическая конференция "Горизонты Вселенной", 3–10 июня (Москва, ГАИШ МГУ, 2004).
- CESRA Workshop 2004 "The high energy solar corona: waves, eruptions, particles", June 7–11 (Isle of Skye, Scotland, 2004).
- IAU Symposium 223 "Multi–Wavelength Investigation of Solar Activity", 14–19 июня (Санкт–Петербург, 2004).
- Conference "Astronomy in Ukraine — Past, Present and Future", 15–17 июля (Киев, ГАО НАНУ, 2004).
- Четвертая украинская конференции по перспективным космическим исследованиям, 12–19 сентября (Крым, Кацивели, 2004).

- Восьмой съезд Астрономического общества и Международного симпозиума "Астрономия 2005: состояние и перспективы развития", 1–6 июня (Москва, ГАИШ МГУ, 2005).
- Конференция "Физика небесных тел", 11–18 сентября (Крым, НИИ "КрАО", 2005).
- Всероссийская конференция "Экспериментальные и теоретические исследования основ прогнозирования гелиофизической активности", 10–15 октября (Троицк, ИЗМИРАН, 2005).
- IAU Symposium 233 "Solar Activity and its Magnetic Origin", March 31–April 4 (Cairo, Egypt, 2006).
- The XXVIth General Assembly IAU, August 14–25 (Prague, Czech Republic, 2006).
- Конференция "Физика Солнца", 11–16 сентября (Крым, НИИ "КрАО", 2006).
- Четвертая астрономические конференции "Избранные вопросы астрономии и астофизики", посвященная памяти Богдана Бабия, 18–21 октября (Львов, ЛНУ, 2006).
- Конференция "Солнце активное и переменное", 2–8 сентября (Крым, НИИ "КрАО", 2007).
- The 7–th Annual International Conference "Relativistic Astrophysics, Gravitation and Cosmology", May 23–25 (Киев, АО КНУ, 2007).
- CESRA Workshop "Solar Radio Physics and the Flare–CME Relationship", June 12–16 (Ioannina, Greece, 2007).
- XI Пулковская международная конференция по физике Солнца "Физическая природа солнечной активности и прогнозирование ее геофизических проявлений", 2–7 июля (Санкт–Петербург, ГАО РАН, 2007).
- Симпозиум "Международный гелиофизический год. Новый взгляд на солнечно–земную физику", 5–10 ноября (Звенигород, 2007).

Всего опубликовано около 50 тезисов докладов.

Диссертационная работа выполнена согласно научным планам НИИ "Крымская астрофизическая обсерватория" МОНУ и Главной (Пулковской)

обсерватории РАН. Исследования проводились в рамках научных тем "Миллиметровое излучение Солнца"(рег. N 0101U002231), "Исследование крупномасштабных структур в атмосфере Солнца и сейсмология короны"(рег. N 0105U002195), "Мониторинг солнечной активности для диагностики космической погоды"(рег. N 0105U002196). Работа была поддержана российскими и международными грантами: ИНТАС (N 00–543), программами Президиума РАН "Происхождение и эволюция звезд и галактик", "Активность Солнца" и программой ОФН–16, Российским фондом фундаментальных исследований (гранты N 06–02-16859, 06–02–16838).

Результаты, полученные в работе, входили в списки "Важнейшие достижения в области астрономии" Научного совета РАН по астрономии.

Публикации

По теме диссертации автором опубликовано 50 статей, из них 34 в астрономических журналах, в том числе: 13 — в российских журналах, рекомендованных ВАК для публикации основных результатов ("Астрономический журнал", "Письма в Астрономический журнал", "Известия РАН. Серия физическая"), 15 — в украинских журналах ("Кинематика и физика небесных тел", "Известия КрАО", "Космическая наука и технология", "Journal of Physical Studies"), 4 - в международных журналах ("Solar Physics", "Advances in Space Research"), 14 статей — в сборниках трудов российских и международных научных конференций. Все статьи опубликованы после защиты кандидатской диссертации.

Личный вклад диссертанта

Исследования, представленные в диссертации, выполнены автором как самостоятельно, так и в сотрудничестве с коллегами из НИИ "КрАО", ГАО РАН, САО РАН, ИСЗФ СО РАН, ФГНУ НИРФИ, обсерватории Нобеяма (Япония). Автор принимал активное участие в разработке теоретических моделей и в наблюдениях на РТ–22 НИИ "КрАО". В работах, посвященных аналитическому анализу декремента затухания колебаний корональных петель, исследованию равновесия и устойчивости магнитных конфигураций, модуляции излучения МГД волнами, двойному плазменному резонансу, возбуждению звуковых колебаний в звездных арках, диагностике микроволнового излучения, распространению волн альвеновского типа в атмосферах Солнца и звезд, автору принадлежит инициатива в постановке задач и ведущая роль в их реализации. В остальных работах, опубликованных в соавторстве, вклад автора в решении рассматриваемых проблем равный.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, трех приложений и списка литературы, включающего 534 наименования библиографических источников. Работа содержит 280 страниц и 65 рисунков.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во Введении дана общая характеристика работы, обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследования, основные результаты, выносимые на защиту, указаны их научная новизна и практическая ценность.

Глава 1 посвящена исследованию МГД процессов в корональных арках Солнца и вспыхивающих звезд. Основное внимание уделяется механизму акустического затухания колебаний квазиоднородных магнитных трубок, условиям развития баллонной неустойчивости в корональных арках и проблеме "вмороженности" их оснований в фотосферу.

В разделе 1.1 проведен критический обзор работ по данной тематике. Показано, что без обстоятельного анализа дисперсионного уравнения МГД колебаний магнитной трубки делать заключения о зависимости периода радиальных БМЗ мод только от ее длины некорректно, поскольку их продольная фазовая скорость может зависеть от волнового числа произвольным образом. Обсуждены методы расчета акустического затухания колебаний магнитных трубок. Показана важность учета кривизны корональных петель в случае рассмотрения баллонной неустойчивости. При этом описание плазменных процессов на языке дрейфов заряженных частиц вследствие пренебрежения токами намагничивания может приводить к некорректным выводам. Изложены аргументы, свидетельствующие о необходимости пересмотра существующих подходов, привлекаемых для определения условий закрепления оснований корональных петель.

В разделе 1.2 приведен вывод обобщенного дисперсионного уравнения МГД колебаний квазиоднородных магнитных трубок. Анализируются дисперсионные особенности собственных мод колебаний, а именно, БМЗ, медленных магнитозвуковых (ММЗ) и альвеновских волн [3,8,10,33,34,46,49]. Показано, что в магнитных трубках могут возбуждаться не только неизлучающие, но и излучающие собственные моды колебаний, генерирующие бегущие МГД волны в окружающей плазме [45]. Этот вывод следует из дисперсионного уравнения и асимптотического поведения функций Ханкеля на больших расстояниях от оси трубки, которые принимают вид цилиндрических бегу-

щих волн. Ранее возможность существования излучающих мод была предсказана Зайцевым и Степановым [7*], а также Спруитом [16*]. Предложен новый метод расчета декремента акустического затухания на основе законов сохранения энергии, который для изгибных колебаний приводит к результату, согласующемуся с соответствующим выражением для декремента из решения дисперсионного уравнения. В случае радиальных БМЗ мод формулы для декрементов акустического затухания, полученные разными методами, совпадают лишь с точностью до коэффициента. С целью выяснения такого несоответствия дисперсионное уравнение решается численно [46,49]. Показано, что формула Зайцева–Степанова [7*] для декремента затухания БМЗ волн является более адекватной. Проведенный численный анализ также свидетельствует, что когда плазменный параметр $\beta \ll 1$ и продольные волновые числа $k < k_c$, где k_c — критическое число, отделяющая излучающие ($k < k_c$) моды от неизлучающих ($k \geq k_c$), период радиальных колебаний магнитных трубок при $ka \ll 1$ равен

$$T_p \approx \frac{2\pi a}{\eta_j \sqrt{v_A^2 + c_s^2}},$$

здесь $\eta_j \approx 2.40, 5.52 \dots$ — нули функции Бесселя первого рода нулевого порядка, v_A и c_s — соответственно альвеновская скорость и скорость звука внутри трубки. Поэтому, в отличие от утверждения авторов работы [17*], период T_p определяется радиусом сечения петли a , а не ее длиной L , и декремент акустического затухания

$$\nu_a \approx \frac{\pi}{2} \omega \frac{\rho_e}{\rho_i},$$

где $\omega = 2\pi/T_p$ — частота колебаний, ρ_e и ρ_i — плотности плазмы снаружи (e) и внутри (i) петли. Следовательно, при $\rho_i \gg \rho_e$, что характерно для вспыхивающих арок солнечной короны, радиальные колебания могут быть высокочастотными. Полученные соотношения использованы для проведения диагностики плазмы и магнитных полей корональных петель Солнца и вспыхивающих звезд [10,25,28,32–34].

В разделе 1.3 изучены механизмы возникновения баллонной моды желобковой неустойчивости в корональных арках [31,27,37]. Показано, что если учесть разделение электрических зарядов в замагниченной плазме из-за градиентного и центробежного дрейфов заряженных частиц в неоднородном магнитном поле, то диамагнитные эффекты, обусловленные токами намагничивания, способны полностью компенсировать силы, ответственные за образование плазменных "языков". Это предполагает необходимость учета диамагнетизма плазмы и применение уравнений идеальной МГД для описания бал-

лонной неустойчивости в коронах Солнца и звезд. Между тем обычно считается, что "качественная" модель данного явления следует из дрейфовой теории [18*]. Определены основные ограничения, накладываемые на применимость вариационного принципа (энергетического метода) для исследования устойчивости плазменных магнитных конфигураций. Обращено внимание на физическое различие магнитных трубок в лабораторных плазменных установках (граница "плазма-вакуум") от трубок в коронах Солнца [1,6,37], звезд [28,32] и в магнитосферах планет [12,13] (граница "плазма-плазма"). Показано, что если условие консервативности (замкнутости) системы нарушается, то становится возможным развитие колебательных неустойчивостей (overstability). В приближении резкой границы "плазма-плазма" со смежной поверхностью площади S дестабилизирующий член, описывающий вторую вариацию потенциальной энергии, сводится к выражению

$$\delta W_S = \oint_S \left\{ \frac{\langle p \rangle}{R} + \frac{\langle \rho \rangle}{2} g_n \right\} s_n^2 dS.$$

где $\langle p \rangle = p_i - p_e$ и $\langle \rho \rangle = \rho_i - \rho_e$ — разность газовых давлений и плотности плазмы внутри и снаружи системы, R — радиус кривизны магнитных силовых линий, g_n и s_n — нормальные к направлению поля компоненты ускорения свободного падения и смещения. Как следует из уравнения, если $p_i \gg p_e$ и $\rho_i \gg \rho_e$, что характерно для корональных петель, то первый член, стоящий под знаком поверхностного интеграла, формально соответствует хорошо известной из дрейфовой теории центробежной силе p_i/R . Однако ее происхождение в рассматриваемом случае связано с нарушением баланса градиентов полных давлений, а не разделением зарядов в области границы, возникающим под действием центробежного и градиентного дрейфов. Поскольку в замагниченной бесстолкновительной плазме газовое давление поперек магнитного поля определяется токами намагничивания, то они будут ответственны за развитие баллонной неустойчивости. Это предполагает необходимость разделения понятий дрейфовой и МГД принципов соответствия.

Из анализа собственных мод колебаний тонкой тороидальной петли в квазицилиндрической системе координат следует, что решения линеаризованной системы уравнений идеальной МГД можно представить в виде суммы двух членов разных порядков малости [37]. Первый описывает колебания плазменного цилиндра, а второй — эффекты, обусловленные кривизной магнитных силовых линий. Используя данное обстоятельство, а также редуцированное выражение для второй вариации потенциальной энергии установлено, что в корональных петлях баллонная неустойчивость наиболее эффективно

раскачивается изгибными колебаниями. При этом критерий возникновения неустойчивости сводится к виду [37]

$$\beta > 2\frac{a}{R},$$

т.е. она легко возбуждается даже в тонких ($R \gg a$) корональных арках. На основе наблюдательных данных обсуждена возможность формирования шлемовидных структур и плазмоидов над вспышечными петлями в результате развития баллонной неустойчивости.

В разделе 1.4 рассмотрены условия закрепления оснований корональных арок в фотосфере, которые существенно влияют как на развитие МГД неустойчивостей, так и на возбуждение собственных мод петель. С помощью закона сохранения энергии показано [36], что жесткое закрепление оснований (rigid wall condition) выглядит более обоснованным, чем закрепление только в поперечном направлении (flow-through condition). Детально анализируются фазовые соотношения между продольными и поперечными смещениями в случае возбуждения собственных мод. Поскольку при колебаниях разность фаз между такими смещениями равна $\pi/2$ (узлу соответствует пучность и наоборот), то жесткое закрепление оснований петель (условие "вмороженности") казалось бы невозможно. Для разрешения этого противоречия исследовано соотношение между амплитудами колебаний. Выяснено, что при малых значениях параметра β как для изгибных, так и радиальных мод продольные смещения оказываются пренебрежимо малыми по сравнению с поперечными, что позволяет считать основания петель жестко закрепленными.

Глава 2 посвящена корональной сейсмологии Солнца и звезд. Особое внимание уделяется методам диагностики плазмы и магнитных полей во вспышечных петлях по наблюдениям пульсаций в различных диапазонах длин волн: радио, оптике, рентгене.

В разделе 2.1 изложена история возникновения корональной сейсмологии Солнца и звезд. Проводится обзор литературы. Подробно рассмотрены вопросы происхождения короткопериодических колебаний излучения, а также отождествления альвеновских волн по радионаблюдениям.

В разделе 2.2 рассмотрена модуляция тормозного и магнитотормозного механизмов излучения МГД колебаниями в магнитных пятнах и корональных арках. Показано [29], что при модуляции акустическими модами тормозного излучения однородного источника глубина модуляции M достаточно мала и существенно не зависит от оптической толщины. Однако в случае магнитотормозного механизма для оптически тонкого источника с ростом номера

циклотронной гармонике значение M может возрасти в несколько раз. Это позволяет объяснить наблюдаемый интервал глубин модуляций микроволнового излучения, следующий из сравнения амплитуд пульсаций на спутнике TRACE и радиотелескопе VLA. Для оптически тонкого источника альвеновские возмущения могут приводить к достаточно сильным флуктуациям теплового магнитормозного излучения [28]. Поскольку эффективность модуляции для обыкновенных волн заметно выше, чем для необыкновенных, то колебания параметров Стокса I и V могут происходить как в фазе, так и в противофазе, что согласуется с наблюдениями. Как свидетельствует анализ модуляции оптического излучения, радиальные колебания петель более эффективно модулируют оптически тонкое тормозное излучение тепловой плазмы [32,33].

В разделе 2.3 проведен анализ модуляции нетеплового излучения МГД модами корональных арок [42,43]. Установлено, что волны альвеновского типа (изгибные и крутильные), наиболее эффективно модулируют интенсивность I гиротронного излучения, если угол между направлением магнитного поля и лучом зрения $\theta \lesssim 60^\circ$. В этом случае глубина модуляции оптически тонкого источника $M_1 \gtrsim 0.1$, и с уменьшением θ она быстро возрастает. При больших углах эффективнее модулируется степень круговой поляризации и соответственно параметр Стокса V . Полученные оценки предполагают, что высокочастотные ($\gtrsim 10$ ГГц) микроволновые наблюдения могут быть использованы для исследований условий возбуждения и распространения альвеновских волн во вспышечных петлях [45].

В модели коронального пробкотрона исследовано влияние радиальных БМЗ колебаний корональных арок на нетепловое гиротронное излучение захваченных электронов. Установлено, что в режиме умеренной питч-угловой диффузии концентрация ускоренных частиц со временем не меняется, если период БМЗ мод значительно больше характерного времени жизни захваченных в ловушке электронов. В этом случае осцилляции для оптически тонкого и оптически толстого источника происходят в противофазе. Получено соотношение, позволяющее по глубине модуляции нетеплового гиротронного излучения оценивать показатель спектра ускоренных электронов [10].

В разделе 2.4 показано, что затухание радиальных БМЗ колебаний в плотных ($\gtrsim 10^{11}$ см $^{-3}$) вспышечных петлях определяется ионной вязкостью и электронной теплопроводностью [10,33], тогда как ММЗ колебаний — электронной теплопроводностью [34]. Приводятся выражения для декрементов затухания БМЗ и альвеновских мод в случае редких столкновений [46,50]. Об-

суждаются диссипативные процессы, обусловленные аномальной вязкостью и теплопроводностью, а также механизмы резонансного поглощения и фазового смешивания [38].

В разделе 2.5 исследовано влияние топологии магнитного поля на возбуждение, распространение и затухание изгибных колебаний корональных петель [9]. Высказана гипотеза, что открытая конфигурация магнитного поля во внешней области может служить причиной отсутствия видимых квазипериодических смещений корональных петель из-за генерации ими волн, распространяющихся вдоль магнитных силовых линий, которые вызывают быстрый отток волновой энергии. Не исключена также важная роль данного механизма в наблюдаемой низкой добротности изгибных колебаний. Вместе с тем, если количество узлов стоячей волны велико, то акустическое затухание изгибных мод будет незначительным. Это означает, что мелкомасштабные волны способны обеспечить более эффективный нагрев плазмы корональных петель, выступающих в роли волноводов.

В разделе 2.6 дана интерпретация быстрого уменьшения амплитуды квазипериодических пульсаций метрового радиоизлучения со временем в радиовсплеске IV типа [46]. Показано, что ввиду малой плотности плазмы в источнике излучения ($\sim 10^8 \text{ см}^{-3}$) для оценки ионной вязкости и электронной теплопроводности формулы Брагинского [19*] не применимы. В свою очередь, поскольку кулоновские соударения также не способны обеспечить наблюдаемую низкую добротность колебаний, то их быстрое затухание связывается с акустическим механизмом. Принятая модель позволила оценить отношение концентраций плазмы внутри и снаружи петли ($\approx 10^2$), а также характерную высоту источника ($\gtrsim 5.6 \times 10^9 \text{ см}$).

В разделе 2.7 для события 23 мая 1990 г. микроволновые осцилляции излучения с $T_p \approx 1.5 \text{ с}$, происходившие на частотах 9 и 15 ГГц в противофазе, объяснены возбуждением радиальных БМЗ колебаний во вспышечной петле [10]. Наблюдаемое соотношение между пиками пульсаций в различных частотных каналах обусловлено модуляцией нетеплового гиротронного излучения радиальными модами. Приведенные выражения позволяют оценивать показатель спектра ускоренных электронов, оптические толщины источников излучения, а также величину магнитного поля по наблюдаемым характеристикам пульсаций [10].

В разделе 2.8 проведен вейвлет-анализ микроволнового излучения события 15 апреля 2002 г., которое наблюдалось на радиогелиографе Нобейма. Выявлены квазипериодические пульсации с периодом около 25 с. На основе изображений, полученных на спутниках RHESSI, TRACE и SOHO, сделан вывод о

связи вспыхивающего энерговыделения с развитием баллонной неустойчивости, сопровождаемой раскачкой изгибных колебаний. Особенности формирования и выбросы крупномасштабных плазмоедов, обнаруженные на RHESSI в мягком рентгеновском диапазоне, объяснены отделением плазменного "языка" из-за пересоединения магнитных силовых линий в области вершины петли. Подчеркнуто, что наблюдаемое образование нескольких блобов могло быть следствием многократного развития неустойчивости. Поскольку их формирование происходило также на послеимпульсной фазе вспышки и не сопровождалось какими-либо мощными всплесками, вопрос о роли плазмоедов в инициировании процесса вспыхивающего энерговыделения остается открытым.

В разделе 2.9 приведены аргументы, свидетельствующие о связи десятисекундных квазипериодических пульсаций оптического излучения, обнаруженных во время вспышки на активных красных карликах EV Lac и EQ Peg B, с возбуждением излучающих БМЗ колебаний в корональных петлях, которые вызывают модуляцию потока ускоренных частиц. Неизлучающие моды едва ли ответственны за наблюдаемые пульсации, так как для этого петли должны быть толстыми ($L \sim a$), что в контексте солнечно-звездной аналогии представляется маловероятным. Изгибные волны практически на сжимают плазму, а значит, они не способны эффективно модулировать поток "высыпавшихся" в основаниях ускоренных частиц, тогда как ММЗ моды предполагают нереально малые длины вспыхивающих петель. В диссертации разработан новый метод диагностики [33], позволяющий находить температуру плазмы T , ее концентрацию n и магнитное поле B во вспыхивающих петлях по наблюдаемому периоду пульсаций T_p , добротности Q и глубине модуляции M с помощью соотношений

$$T \approx 2.4 \times 10^{-8} \frac{A^2 M}{T_p^2 \chi},$$

$$n \approx 1.97 \times 10^{-12} \frac{A^3 \kappa M^{5/2} Q \sin^2 \theta}{T_p^4 \chi^{3/2}},$$

$$B \approx 9.06 \times 10^{-18} \frac{Q^{1/2} A^{5/2} \kappa^{1/2} M^{5/4} \sin \theta}{T_p^3 \chi^{5/4}},$$

где $A = 2\pi a/\eta_0$, $\chi = 20/3M + 2$, $\kappa = 486M \cos^2 \theta + 1$, $\theta = \arctg(\eta_0 L/\pi a)$. На их основе для вспышки на EV Lac получены следующие физические параметры в области вспыхивающего энерговыделения: $T \approx 3.7 \times 10^7$ К, $n \approx 1.6 \times 10^{11}$ см $^{-3}$. Показано, что гипотеза Маллена и др. [20*], в соответствии с которой горячая плазма корональных петель может вносить существенный вклад в оптическое излучение звезд, сталкивается с трудностями. Попытка Матиодакиса и

др. [21*] связать наблюдаемые осцилляции с неизлучающими радиальными модами также недостаточно обоснована, поскольку в этом случае из-за сдвига фаз между поперечными и продольными смещениями нарушается условие "вмороженности" оснований арки. Как и для EV Lac определены параметры вспышечной петли на EQ Peg B: $T \approx 6 \times 10^7$ К, $n \approx 2.7 \times 10^{11}$ см⁻³, $B \approx 540$ Гс, которые отличаются от значений, полученных Малленом и др. [22*] с помощью размерностных соотношений.

В разделе 2.10, следуя Митре-Краевой и др. [23*] и используя результаты рентгеновских наблюдений на спутнике XMM-Newton, рассмотрены квазипериодические десятиминутные пульсации мягкого рентгеновского излучения на активном красном карлике AT Mic. Приведены дополнительные аргументы, указывающие на связь наблюдаемых пульсаций с ММЗ модами вспышечной арки. Анализ возможных механизмов возбуждения этих мод показал, что они не могут быть вызваны увеличением газового давления внутри петли, как предполагалось Митрой-Краевой и др. [23*], поскольку в этом случае глубина модуляции излучения должна быть слишком большой. Поэтому оценка напряженности магнитного поля петли в [23*] занижена и не отражает сути рассматриваемого явления. Проникновение ММЗ волн из фотосферы в корону также выглядит проблематичным из-за сравнительно низкой температуры поверхности звезды AT Mic ($T_\star \approx 0.55T_\odot$) и ее малого радиуса ($R_\star \approx 0.47R_\odot$). Это приводит к тому, что частота акустической отсечки даже с учетом возможного отклонения магнитных трубок от вертикального направления оказывается слишком высокой, чтобы обеспечить эффективный перенос энергии низкочастотных фотосферных возмущений в верхние слои атмосферы бегущими волнами. За раскачку ММЗ мод скорее ответственен поток плазмы вдоль магнитного поля, обеспечивающий раскачку продольных смещений "поршневым" механизмом. Предложенная методика [34] позволила найти концентрацию плазмы в области вспышечного энерговыделения $n \approx 3.2 \times 10^{10}$ см⁻³, которая согласуется с результатами спектральных рентгеновских наблюдений на орбитальной станции XMM-Newton. Как следует из условия малости параметра $\beta \lesssim 1$, магнитное поле арки $B \gtrsim 105$ Гс. Получены свидетельства о неадекватности весьма распространенного одномерного моделирования процессов возбуждения ММЗ колебаний в петлях [34].

Глава 3 посвящена проблемам генерации плазменной турбулентности в корональных арках и связанных с нею явлений. Рассмотрено происхождение необычной зебра-структуры солнечных радиовсплесков IV типа и приведена интерпретация наблюдательных данных в сантиметровом диапазоне длин

волн.

В разделе 3.1 обсуждены причины временных задержек между пиками микроволнового и жесткого рентгеновского излучений, а также явление медленного ($V \approx 0.03c$) распространения нетеплового источника микроволнового излучения в солнечной корональной арке, обнаруженное на радиогелиографе Нобеяма. Значительное внимание уделяется явлению двойного плазменного резонанса и возбуждению альвеновской турбулентности ускоренными протонами в верхней хромосфере Солнца.

В разделе 3.2 на основе модели коронального пробкотрона показано, что если диффузия ускоренных электронов в конус потерь определяется кулоновскими столкновениями, то в случае достаточно больших пробочных отношений ($\sigma \gtrsim 3$) жесткое рентгеновское излучение должно доминировать в корональной части арки [11]. Это предполагает важную роль плазменной турбулентности в динамике захваченных корональной ловушкой электронов, поскольку такой вывод противоречит наблюдениям, свидетельствующих о локализации источника в основаниях петель.

В разделе 3.3 проводится сравнительный анализ конусных неустойчивостей свистов и электростатических волн на электронах релятивистских энергий в корональных арках активных областей Солнца и вспыхивающих звезд, когда отношение плазменной частоты к электронной гирочастоте не слишком велико ($\omega_e/\Omega_e \lesssim 3$). Показано, что высокоэнергичные ($\gtrsim 1$ МэВ) электроны возбуждают свисты эффективнее электростатических колебаний. При этом релятивистский инкремент в $\sim (c/v)^2$ больше нерелятивистского, что объясняется увеличением массы ускоренных частиц [23]. Результаты свидетельствуют о доминирующем влиянии свистов на диффузию релятивистских электронов в корональных арках.

В разделе 3.4 рассмотрен противоположный случай, реализуемый в относительно плотных арках при $\omega_e/\Omega_e \gg 1$. Исследовано возбуждение верхнегибридных волн энергичными электронами с конусом потерь на двойном плазменном резонансе, когда плазменная частота $\omega_e \approx l\Omega_e$ [44,47]. В отличие от работы Железнякова и Злотник [24*] проанализированы условия двойного плазменного резонанса для частиц, функция распределения которых не имеет ярко выраженного максимума по импульсам p как в случае распределения DGH. На основе аналитических и численных расчетов показано, что электронный пучок со степенным распределением

$$f(p) \propto \begin{cases} 0, & p < p_m; \\ \left(\frac{p}{p_m}\right)^{-\delta_p}, & p \geq p_m; \end{cases}$$

и с конусом потерь приводит к формированию большого числа ($\gtrsim 30$) зебра-полос в радиовсплесках IV типа. Конусная неустойчивость на двойном плазменном резонансе для масквелловского распределения в согласии с выводами Вингли и Далка [25*] оказывается гораздо менее выраженной. Поэтому предположение Чернова и др. [13*] о том, что лишь распределения с резким максимумом по импульсам могут быть ответственны за эффективную раскачку верхнегибридных волн на двойном плазменном резонансе нельзя считать достаточно обоснованным. Разработанная теоретическая модель позволяет объяснить большое число (> 30) полос зебра-структуры в динамических спектрах солнечных вспышек.

В разделе 3.5 исследовано влияние альвеновской турбулентности на ударную поляризацию $\text{H}\alpha$ -излучения солнечных вспышек, степень которой в среднем составляет несколько процентов. Поскольку для некоторых событий она оказывается $< 0.07\%$ [26*], возникает необходимость поиска физических механизмов, ответственных за деполяризацию. В диссертации показано [39,40,50], что увеличение магнитного поля в хромосферной части вспышечной арки с глубиной не оказывает заметного влияния на процесс коллимации пучка протонов из-за столкновений. Мелкомасштабные альвеновские волны, несмотря на высокую концентрацию нейтральных атомов в хромосфере, эффективно возбуждаются потоком низкоэнергичных (10 – 100 кэВ) протонов. Это приводит к изотропизации ускоренных частиц и, соответственно, к деполяризации $\text{H}\alpha$ -излучения. Уровень альвеновской турбулентности в хромосфере зависит от мощности потока ускоренных частиц, энергетического спектра и плотности фоновой плазмы. Результаты исследований свидетельствуют о возможности реализации как умеренной, так и сильной диффузии низкоэнергичных протонов на альвеновских волнах в верхней хромосфере Солнца [50], что может стать причиной повышенной линейной поляризации излучения в крыльях, а не в ядре линии $\text{H}\alpha$.

В разделе 3.6 на основе оригинальных наблюдений, проведенных на РТ-22 НИИ "КрАО", исследовано микроволновое излучение солнечной вспышки 14 июля 2000 г. ("Бастилия") на частотах 8.6, 13.3 и 15.4 ГГц [15,22]. Используя изображения источников, полученные на спутниках Yohkoh и SOHO, показано, что смена знака круговой поляризации микроволнового излучения произошла вследствие смещения источника из западной части активной области в восточную с иной магнитной конфигурацией. Предположено, что обнаруженная временная задержка около 1 мин между пиками жесткого рентгеновского и микроволнового излучений вызвана реализацией режима сильной питч-угловой диффузии захваченных высокоэнергичных электронов на сви-

стах в конус потерь коронального пробкотрона [15].

В разделе 3.7 исследован всплеск IV типа с необычной зебра-структурой, наблюдавшийся на послевспышечной фазе события 21 апреля 2002 г. с помощью спектрополяриметра станции Хуайроу Национальной астрономической обсерватории Китая в интервале 2.6 – 3.8 ГГц. Явление двойного плазменного резонанса позволило объяснить основные особенности динамического спектра зебра-структуры: большое число полос, монотонное уменьшение контрастности и интервала между ними на более низких частотах. Наблюдаемые короткие пульсации в зебра-структуре объяснены инжекцией пучков электронов в корональную арку из оснований вследствие слияния магнитных островов токового слоя, образующихся в результате тиринг-неустойчивости. Сделан вывод о том, что в рассматриваемом событии характерные масштабы изменения магнитного поля и плотности корональной плазмы сравнимы между собой. Получены оценки концентрации электронов $n \approx 10^{11} \text{ см}^{-3}$ и магнитного поля $B \approx 38 \text{ Гс}$ в источнике излучения [47].

Глава 4 посвящена путям решения фундаментальной проблемы астрофизики — нагреву корон звезд. В настоящее время обсуждаются главным образом три механизма нагрева: электрическими токами корональных петель, альвеновскими волнами, а также микро- и нановспышками. В диссертации основное внимание уделено последним двум механизмам нагрева.

В разделе 4.1 проведен критический анализ работ, посвященных нагреву корональной плазмы альвеновскими волнами и элементарными вспышечными событиями. Особое внимание уделено проблеме роста амплитуд альвеновских волн с высотой при распространении из фотосферы в корону, а также их отражению в закрытых и открытых магнитных конфигурациях стратифицированной атмосферы. Обсуждена возможность привлечения микроволновых наблюдений активных областей для выявления источников нагрева плазмы.

В разделе 4.2 исследованы основные особенности распространения альвеновских волн в атмосферах звезд. Согласно современным наблюдениям с высоким пространственным разрешением, тонкоструктурные магнитные элементы Солнца с величиной поля более одного килोगаусса могут располагаться как на границе, так и внутри ячеек супергрануляции. Поскольку значение параметра β с высотой быстро уменьшается и соответственно радиус сечения изолированных магнитных трубок увеличивается, то солнечную атмосферу можно условно разделить на две части. В первой доминируют изолированные тонкие трубки (область фотосфера–хромосфера), а во второй, вследствие их слияния — квазиоднородное магнитное поле (хромосфера–корона). Гра-

ницу между этими двумя слоями иногда называют магнитным балдахином (magnetic canopy). Оценки показывают, что усредненный поток энергии альвеновских волн на уровне фотосферы $\approx 6 \times 10^6$ эрг $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$. Следовательно, хотя данные моды способны компенсировать энергетические потери корональной плазмы спокойного Солнца $((1-20) \times 10^4$ эрг $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$), тем не менее, для активных областей $(2 \times (10^5 - 10^6)$ эрг $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$) этого вклада может оказаться недостаточно. Поэтому необходимы детальные исследования условий проникновения из фотосферы в корону волн альвеновского типа (поперечных и крутильных), возбуждаемых в тонких магнитных трубках.

Как свидетельствует анализ, отражение альвеновских волн в стратифицированной атмосфере происходит лишь от неоднородностей определенного вида. Иначе можно прийти к парадоксальному выводу, что данные моды полностью отражаются в короне. Аналитические расчеты коэффициента отражения R от переходного слоя между хромосферой (h) и короной (c) в приближении резкой границы, когда длина волны $\lambda \gg 4\pi H$, где H — характерная шкала высоты в хромосфере, приводят к следующему выражению [41]

$$R \approx 1 - 2\pi \sqrt{\frac{\rho_c}{\rho_h}} \eta,$$

здесь $\eta = 2H\omega/v_{Ah}$. В отличие от формулы Холлвега [27*], полученное соотношение предполагает существенно бóльшие значения R . В диссертации показано, что альвеновские волны с периодами менее несколько десятков секунд способны эффективно проникать из фотосферы в корону Солнца, поскольку в этом случае волновой поток из-за отражения уменьшается менее чем в 3 раза. Следовательно, ввиду сильного поглощения короткопериодических ($T_p \lesssim 10$ с) альвеновских возмущений в частично-ионизованной хромосферной плазме [28*], лишь волны с $T_p = 10 - 40$ с способны обеспечить нагрев короны и формирование высокоскоростных потоков солнечного ветра. Их генерация в фотосфере может происходить в результате как "столкновений" магнитной трубки с окружающими ее гранулами, так и под действием конвективных движений вещества.

Исследовано распространение поперечных мод тонких неизолированных магнитных трубок в изотермической стратифицированной атмосфере. Под влиянием внешнего магнитного поля замедляется рост амплитуд волн δv с высотой и уменьшается частота отсечки Спруита. Причем над магнитным балдахином значения δv увеличиваются медленней, чем альвеновская скорость. Делается вывод о том, что крутильные моды эффективнее поперечных переносят энергию конвективных движений из фотосферы в корону, так

как их амплитуды в области изолированных магнитных трубок от высоты не зависят.

В разделе 4.3 рассмотрено распространение ускоренных в короне Солнца электронов вглубь атмосферы [35,38]. Такой анализ необходим для выяснения роли элементарных вспышечных событий в тепловом балансе активной области. Получена зависимость эффективности нагрева от глубины проникновения электронов. Показано, что частицы с показателем энергетического спектра $\delta \gtrsim 4$ теряют основную часть своей энергии при прохождении расстояния, соответствующему полной остановке электронов с минимальной начальной энергией. Приводится аналитическое выражение, которое позволяет оценить полный поток ускоренных электронов, обусловленный элементарными вспышечными событиями.

В разделе 4.4 исследованы механизмы, ответственные за формирование горячих прослоек плазмы в радиоисточниках, связанных с пятном. Это приводит к наблюдаемой инверсии знака круговой поляризации микроволнового излучения. С ростом температуры прослойки происходит значительное увеличение потоков микроволнового излучения в диапазоне 2 — 4 см, что характерно для протонных событий. Установлена возможность двукратной инверсии знака поляризации по частоте для горячих прослоек, что согласуется с наблюдениями. В соответствии с полученными оценками, низкоэнергичные электроны гало активной области, "высыпающиеся" из короны в переходную зону и верхнюю хромосферу Солнца, не способны обеспечить требуемые температуры прослоек, поэтому за инверсию температуры вероятнее ответственные локальные процессы энергоснабжения [20,35].

В разделе 4.5 на основе оригинальных данных, полученных из наблюдений активной области NOAA 9628 на РТ-22 НИИ "КрАО" в микроволновом диапазоне, обнаружено, что значительными амплитудами в динамических спектрах мощности пульсаций с периодом $T_p < 10$ мин обладают колебания с $T_p = 10 - 40$ с, имеющие вид низкодобротных цугов [21,24,26,29]. Секундные колебания ($T_p < 10$ с) не выявлены ни в одной из реализаций. Предполагается, что ввиду сильной диссипации короткопериодических акустических волн наблюдаемые пульсации могут быть обусловлены распространением альвеновских волн, генерируемых конвективными движениями в фотосфере.

В разделе 4.6, исходя из микроволновых наблюдений на радиотелескопах РТ-22, РАТАН-600 и ССРТ, исследована эволюция и структура АО NOAA 0139 [38]. Как следует из проведенного анализа с привлечением оптических и ультрафиолетовых данных, сильную депрессию микроволнового излучения, обнаруженную на коротких длинах волн, можно объяснить умень-

шением числа и мощности элементарных вспышечных событий. Это приводит к уменьшению нагрева плазмы в переходном слое и верхней хромосфере потоками ускоренных электронов, что и проявилось в виде наблюдаемой депрессии.

В Заключение сформулированы основные результаты диссертации.

1. Аналитические и численные расчеты показали, что для корональных арок Солнца и звезд радиальные БМЗ моды являются излучающими, а их период определяется радиусом сечения петель, а не их длиной.
2. Изгибные колебания тонких корональных петель могут приводить к развитию баллонной МГД неустойчивости и формированию шлемовидных магнитных структур и плазмоидов в солнечных вспышках.
3. Жесткое закрепление оснований корональных петель накладывает ограничения на возбуждение собственных БМЗ колебаний из-за сдвига фаз продольных и поперечных смещений.
4. Волны альвеновского типа эффективно модулируют гиросинхротронное излучение корональных петель, которое может служить индикатором возбуждения и распространения этих мод во вспышечных петлях.
5. Детально разработаны диагностические методы корональной сейсмологии, позволяющие определять основные параметры корональных петель Солнца и вспыхивающих звезд по характеристикам пульсаций вспышечного излучения.
6. Анизотропные релятивистские электроны генерируют свисты эффективнее электростатических мод в корональных арках активных областей Солнца и звезд, если отношение плазменной частоты к электронной циклотронной $\omega_e/\Omega_e \lesssim 3$.
7. Конусная неустойчивость энергичных электронов со степенным распределением по импульсам на двойном плазменном резонансе при $\omega_e/\Omega_e \gg 1$ может быть ответственна за формирование многополосной зебра-структуры в микроволновых солнечных всплесках.
8. Мелкомасштабная альвеновская турбулентность эффективно возбуждается низкоэнергичными протонами (10–100 кэВ) в верхней хромосфере Солнца, вызывая их изотропизацию и, следовательно, деполяризацию H α -излучения.

9. Альвеновские волны с $T_p = 10 - 40$ с способны вносить существенный вклад в нагрев солнечной корональной плазмы, если их генерация на уровне фотосферы происходит в интенсивных (килогауссовых) магнитных трубках.
10. Крутильные волны магнитных трубок эффективнее поперечных переносят механическую энергию конвективных движений в короны звезд.
11. Элементарные вспышечные события могут вносить существенный вклад в нагрев плазмы переходного слоя и верхней хромосферы активных областей Солнца.

Основные публикации по теме диссертации

1. Tsap Y.T. On the Prominence Formation // Proc. of The 9th European Meeting on Solar Physics "Magnetic Fields and Solar Processes" / Ed. A. Wilson, ESA Publ. Division, 1999. ESA SP-448. P.525-527.
2. Степанов А.В., Цап Ю.Т. Спектры энергичных электронов и жесткое рентгеновское излучение солнечных вспышек // Астрон. журн. 1999. Т.76, N 12. С.949-960.
3. Kopylova Y.G., Tsap Y.T. On the acoustic damping of fast kink mode oscillations of active region coronal loops. Сборник тезисов докладов конференции "Солнце в максимуме активности и солнечно-звездные аналоги". ГАО РАН, СПб, 2000. С.254-256.
4. Tsap Y.T. On the cascading acceleration of the quasi-thermal electrons by MHD turbulence in solar flares // Solar Phys. 2000. V.194, N 1. P.131-136.
5. Цап Ю.Т. Механизмы ускорения электронов в солнечных вспышках // Изв. Крымской астрофиз. obs. 2000. Т.96. С.165-175.
6. Цап Ю.Т., Шаховская А.Н. Граничные условия и формирование полостей в окрестности протуберанцев // Кинематика и физика небесных тел. 2000. Т.16, N 4. С.303-315.
7. Степанов А.В., Цап Ю.Т. Взаимодействие волна-частица в корональных магнитных петлях: стационарные условия // Изв. Главной астроном. obs. 2000. N 215. С.101-122.

8. Цап Ю.Т., Копылова Ю.Г. Об акустическом затухании изгибных колебаний солнечных корональных петель // Изв. Главной астроном. обс. 2000. N 215. С.301–310.
9. Цап Ю.Т., Копылова Ю.Г. Механизм акустического затухания быстрых изгибных колебаний корональных петель // Письма в Астрон. журн. 2001. Т.27, N 11. С.859–866.
10. Копылова Ю.Г., Степанов А.В., Цап Ю.Т. Радиальные колебания корональных петель и микроволновое излучение солнечных вспышек // Письма в Астрон. журн. 2002. Т.28, N 11. С.870–879.
11. Цап Ю.Т., Копылова Ю.Г., Нестеров Н.С. Миллиметровое и рентгеновское излучение солнечной вспышки 31 октября 1991 г. // Кинематика и физика небесных тел. 2002. Т.18, N 1. С.3–17.
12. Прокофьева В.В., Таращук В.П., Цап Ю.Т. Свечение натрия кометы Шумейкер-Леви 9 в магнитосфере Юпитера // Письма в Астрон. журн. 2002. Т.28, N 2. С.150–159.
13. Прокофьева В.В., Таращук В.П., Цап Ю.Т. Взаимодействие вещества кометы Шумейкер-Леви 9 с магнитосферой Юпитера и образование натриевых облаков // Кинематика и физика небесных тел. 2001. Т.17, N 6. С.538–548.
14. Stepanov A.V., Tsap Y.T. Electron-whistler interaction in coronal loops and radiation signatures // Solar Phys. 2002. V.211, N 1. P. 135–154.
15. Копылова Ю.Г., Цап Ю.Т., Цветков Л.И. Событие 14 июля 2000 г.: микроволновое излучение // Изв. Крымской астрофиз. обс. 2002. Т.98, N 1. С.84–90.
16. Kopylova Y.G., Stepanov O.V., Tsap Y. T. Coronal seismology and pulsations of microwave emission from solar flares // Journal of Physical Studies. 2002. V.6, N 3. P.421–424.
17. Гельфрейх Г.Б., Гольдварг Т.Б., Копылова Ю.Г., Наговицын Ю.А., Цап Ю.Т., Цветков Л.И., Юровский Ю.Ф. Вариации микроволнового и дециметрового излучения в активных областях солнечной атмосферы // Материалы международной конференции "Солнечная активность и космические лучи после смены знака полярного магнитного поля Солнца", ГАО РАН, СПб, 2002. С.127–132.

18. Будзиновская И.А., Гельфрейх Г.Б., Гольдварг Т.Б. Копылова Ю.Г., Наговицын Ю.А., Цап Ю.Т., Цветков Л.И., Юровский Ю.Ф. МГД возмущения и модуляция микроволнового излучения солнечных активных областей // Сборник докладов конференции стран СНГ и Прибалтики "Актуальные проблемы физики солнечной и звездной активности", Нижний Новгород, 2003, т.2. С.281–284.
19. Копылова Ю.Г., Мельников В.Ф., Степанов А.В., Цап Ю.Т., Шибасаки К., Гольдварг Т.Б. Модуляция гиросинхротронного излучения в событии 28.08.99 // Сборник докладов конференции стран СНГ и Прибалтики "Актуальные проблемы физики солнечной и звездной активности", Нижний Новгород, 2003, т.2. С.288–291.
20. Кальтман Т.И., Коржавин А.Н., Цап Ю.Т. Инверсия знака поляризации пятенных радиоисточников в рамках модели с отрицательным температурным градиентом // Сборник докладов конференции стран СНГ и Прибалтики "Актуальные проблемы физики солнечной и звездной активности", Нижний Новгород, 2003, т.2. С.323–327.
21. Гельфрейх Г.Б., Гольдварг Т.Б. Копылова Ю.Г., Наговицын Ю.А., Цап Ю.Т., Цветков Л.И. Нагрев солнечной короны и вариации микроволнового излучения // Космическая наука и технология. Приложение. 2003. Т.9, N 2. С.243–246.
22. Копылова Ю.Г., Цап Ю.Т. Микроволновое излучение солнечной вспышки "Бастилия" // Космическая наука и технология. Приложение. 2003. Т.9, N 2. С.248–253.
23. Степанов А.В., Цап Ю.Т. Сравнительный анализ конусных неустойчивостей в коронах Солнца и звезд // Космическая наука и технология. 2003. Т.9, N 5/6. С.144–146.
24. Гельфрейх Г.Б., Гольдварг Т.Б. Копылова Ю.Г., Наговицын Ю.А., Цап Ю.Т., Цветков Л.И., Юровский Ю.Ф., Будзиновская И.А. О природе пульсаций микроволнового излучения солнечных активных областей // Космическая наука и технология. 2003. Т.9, N 5/6. С.136–139.
25. Степанов А.В., Копылова Ю.Г., Цап Ю.Т., Шибасаки К., Мельников В.Ф., Гольдварг Т.Б. Пульсации микроволнового излучения и диагностика вспышечной плазмы // Материалы международного семинара "Физика Солнца и звезд", КГУ, Элиста, 2003. С.103–108.

26. Гельфрейх Г.Б., Цап Ю.Т., Копылова Ю.Г., Гольдварг Т.Б., Наговицын Ю.А., Цветков Л.И. Пульсации микроволнового излучения активных областей Солнца по наблюдениям на РТ-22 НИИ "КрАО" // Материалы международного семинара "Физика Солнца и звезд", КГУ, Элиста, 2003. С.109–113.
27. Цап Ю.Т., Копылова Ю.Г. Правило соответствия и желобковая неустойчивость в условиях космической плазмы // Материалы международного семинара "Физика Солнца и звезд", КГУ, Элиста, 2003. С.123–130.
28. Kouprianova E.G., Tsap Y.T., Kopylova Y.G., Stepanov A.V. On the nature of optical oscillations on the flare stars // Proc. of IAU Symp.223 "Multi-Wavelength Investigations of Solar Activity"/ Eds. A.V. Stepanov, E.E. Benevolenskaya, A.G. Kosovichev, Cambridge University Press, 2004. P.391–392.
29. Гельфрейх Г.Б., Цап Ю.Т., Гольдварг Т.Б. Копылова Ю.Г. Наговицын Ю.А., Цветков Л.И. О вариациях микроволнового излучения активных областей солнечной атмосферы // Письма в Астрон. журн. 2004. Т.30, N 7. С.540–547.
30. Степанов А.В., Копылова Ю.Г., Цап Ю.Т., Шибасаки К., Мельников В.Ф., Гольдварг Т.Б. Пульсации микроволнового излучения и диагностика вспышечной плазмы // Письма в Астрон. журн. 2004. Т.30, N 7. С.530–539.
31. Цап Ю.Т., Копылова Ю.Г. Поверхностная неустойчивость желобковых возмущений в условиях космической плазмы // Кинематика и физика небесных тел. 2004. Т.20, N 3. С.210–218.
32. Копылова Ю.Г., Куприянова Е.Г., Степанов А.В., Цап Ю.Т. Природа осцилляций излучения вспыхивающих звезд и диагностика корональных арок // Изв. Главной астроном. обс. 2004. N 217. С.85–94.
33. Степанов А.В., Копылова Ю.Г., Цап Ю.Т., Куприянова Е.Г. Осцилляции оптического излучения вспыхивающих звезд и диагностика корональных петель // Письма в Астрон. журн. 2005. Т.31, N 9. С.684–692.
34. Степанов А.В., Копылова Ю.Г., Цап Ю.Т. Колебания мягкого рентгеновского излучения AT Mic: диагностика вспышечной плазмы // Письма в Астрон. журн. 2006. Т.32, N 8. С.631–636.

35. Кальтман Т.И., Коржавин А.Н., Цап Ю.Т. О смене знака поляризации микроволнового излучения в пятенных радиоисточниках на Солнце // Астрон. журн. 2005. Т.82, N 9. С.838–846.
36. Цап Ю.Т. О закреплении оснований корональных петель // Кинематика и физика небесных тел. 2006. Т.22, N 1. С.40–48.
37. Цап Ю.Т., Копылова Ю.Г., Степанов А.В. Баллонная неустойчивость и колебания корональных петель // Астрон. журн. 2006. Т.50, N 12. С.1026–1035.
38. Цап Ю.Т. Цветков Л.И., Юровский Ю.Ф., Петерова Н.Г, Борисевич Т.П., Агалаков Б.В. Нагрев солнечной короны и микроволновое излучение активной области NOAA 0139 // Кинематика и физика небесных тел. 2006. Т.22, N 5. С.346–362.
39. Степанов А.В., Цап Ю.Т. О природе изотропизации энергичных протонов в атмосфере Солнца // Известия РАН. Серия физ. 2006. Т.70, N 10. С.1466–1468.
40. Stepanov A.V., Tsap Yu.T. Small scale Alfvén waves and isotropization of energetic protons // Proc. of IAU Symp.233 "Solar Activity and its Magnetic Origin" in Cairo / Eds. V. Bothmer, A.A. Hady, Cambridge University Press, 2006, v.2. P.157–160.
41. Tsap Yu.T. On the penetration of Alfvén waves from the chromosphere into the corona // Proc. of IAU Symp.233 "Solar Activity and its Magnetic Origin" in Cairo / Eds. V. Bothmer, A.A. Hady, Cambridge University Press, 2006, v.2. P.253–254.
42. Копылова Ю.Г., Степанов А.В., Цап Ю.Т. О модуляции гиротропного излучения корональных петель альфеновскими колебаниями. Изв. Главной астроном. обс. 2006. N.218. С.275–281.
43. Tsap Yu.T., Stepanov A.V., Kopylova Y.G. Flare energy release and modulation of microwave emission by Alfvén waves // Journal of Physical Studies. 2007. V.11, N 3. P.339–342.
44. Kuznetsov A.A., Tsap Yu.T. Double plasma resonance and fine structure of solar radio bursts // Adv. Space Res. 2007. V.39, N 9. P.1432–1438.

45. Копылова Ю.Г., Цап Ю.Т., Степанов А.В. О распространении альвеновских мод тонких магнитных трубок // Труды XI Пулковской Международной конференции "Физическая природа солнечной активности и прогнозирование ее геофизических явлений", ГАО РАН СПб, 2007. С.207–210.
46. Копылова Ю.Г., Мельников А.В., Степанов А.В., Цап Ю.Т., Гольдварг Т.Б. Колебания корональных петель и секундные пульсации солнечного радиоизлучения // Письма в Астрон. журн. 2007. Т.33, N 10. С.792–800.
47. Kuznetsov A.A., Tsap Yu.T. Loss-cone instability and formation of zebra patterns in the IV type radio bursts // Solar Phys. 2007. V.241, N 1. P.127–143.
48. Цап Ю.Т., Копылова Ю.Г., Степанов А.В. О проникновении акустико-гравитационных и альвеновских волн из хромосферы в корону // Изв. Крымской астрофиз. obs. 2007. Т.103, N4. С.71–78.
49. Копылова Ю.Г., Мельников А.В., Степанов А.В., Цап Ю.Т. Излучательные и безызлучательные моды колебаний тонких магнитных трубок // Изв. Крымской астрофиз. obs. 2007. Т.103, N4. С.79–84.
50. Цап Ю.Т., Степанов А.В. Поляризация $H\alpha$ -излучения и изотропизация протонов в солнечных вспышках // Письма в Астрон. журн. 2008. Т.34, N 1. С.58–65.

Цитируемая литература

- 1*. West A.A., Hawley S.L., Walkowicz L.M. et al. Astron. J. 2004. V.128, N 1. P.426–436.
- 2*. Dyson F. Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 1930. V.91. P.239–241.
- 3*. Alfven H. Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 1947. V.107. P.211–219.
- 4*. Biermann L. Zeitschrift für Astrophysik. 1947. V.25. P.161–177.
- 5*. Schwarzschild M. Astrophys. J. 1948. V.107, N 1. P.1–5.
- 6*. Roberts B., Edwin P.M., Benz A.O. Astrophys. J. 1984. V.279, N 2. P.857–865.
- 7*. Зайцев В.В., Степанов А.В. Исслед. по геомагн., аэрон. и физ. Солнца. 1975. Вып.37. С.3–10.
- 8*. Shibata K., Masuda S., Shimojo M. et al. Astrophys. J. 1995. V.451, N 2. P.L83–L85.
- 9*. Sui L., Holman G.D., White S.M., Zhang J. Astrophys. J. 2005. V.633,

- N 2. P.1175–1186.
- 10*. Aschwanden M.J. *Astrophys. J.* 1998. V.502, N 1. P.455–467.
- 11*. Stepanov A.V., Yokoyama T., Shibasaki K., Melnikov V.F. *Astron. Astrophys.* 2007. V.465, N 2. P.613–619.
- 12*. Беспалов П.А., Трахтенгерц В.Ю. Альфвеновские мазеры. Горький: ИПФАН, 1986. 173 с.
- 13*. Chernov G.P., Yan Y.H., Fu Q.J., Tan Ch.M. *Astron. Astrophys.* 2005. V.437, N 3. P.1047–1054.
- 14*. Klimchuk J.A. *Solar Phys.* 2006. V.234, N 1. P.41–77.
- 15*. Cranmer S R., van Ballegooijen A.A. *Astrophys. J. Sup. Ser.* 2005. V.156, N 2. P.265–293.
- 16*. Spruit H.C. *Solar Phys.* 1982. V.75, N 1/2. P.3–17.
- 17*. Pascoe D.J., Nakariakov V.M., Arber T.D. *Astron. Astrophys.* 2007. V.461, N 3. P.1149–1154.
- 18*. Миямото К. Основы физики плазмы и управляемого синтеза. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. 424 с.
- 19*. Брагинский С.И. Вопросы теории плазмы. 1963. Вып.1. С.183–272.
- 20*. Mullan D.J., Herr R.B., Bhattacharyya S.T. *Astrophys. J.* 1992. V.391, N 1. P.265–275.
- 21*. Mathioudakis M., Bloomfield D.S., Jess D.B. et al. *Astron. Astrophys.* 2006. V.456, N 1. P.323–327.
- 22*. Mullan D.J., Mathioudakis M., Bloomfield D.S., Christian D.J. *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 2006. V.164, N 1. P.173–201.
- 23*. Mitra–Kraev U., Harra L.K., Williams D.R., Kraev E. *Astron. Astrophys.* 2005. V.436, N 3. P.1041–1047.
- 24*. Zhelezniakov V.V., Zlotnik E.Ya. *Solar Phys.* 1975. V.43, N 2. P.431–451.
- 25*. Winglee R.M., Dulk G.A. *Astrophys. J.* 1986. V.307, N 2. P.808–819.
- 26*. Bianda M., Benz A.O., Stenflo J.O. et al. *Astron. Astrophys.* 2005. V.434, N 3. P.1183–1189.
- 27*. Hollweg J.V. *Astrophys. J.* 1984. V.277, N 1. P.392–403.
- 28*. Leake J.E., Arber T.D., Khodachenko M.L. *Astron. Astrophys.* 2005. V.442, N 3. P.1091–1098.