

На правах рукописи

Кислякова Кристина Георгиевна

**АНАЛИЗ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПО
МОДУЛЯЦИЯМ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ**

01.04.03 — радиофизика

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород — 2012

Работа выполнена на кафедре радиотехники радиофизического факультета Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского

Научный руководитель:	профессор, доктор физико-математических наук В. В. Зайцев
Официальные оппоненты:	доктор физико-математических наук В. В. Фомичев профессор, доктор физико-математических наук В. Г. Гавриленко
Ведущая организация:	Учреждение Российской академии наук Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН (г. Санкт-Петербург)

Защита состоится « » марта 2012 г. в « » часов на заседании диссертационного совета Д 212.166.07 при Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского (603950, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23).

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского по адресу: 603950, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, д. 23, корп. 1.

Автореферат разослан 2012 г.

Учёный секретарь диссертационного совета
кандидат физико-математических наук,
доцент

В.В. Черепенников

Общая характеристика диссертации

Предмет исследования и актуальность темы. При изучении астрофизических объектов наибольший интерес представляет исследование их излучения, позволяющее получить информацию об условиях на этих обычно недоступных для контактных измерений объектах. Данная диссертационная работа посвящена исследованию колебательных процессов в солнечной атмосфере и в системе «звезда-планета» в экзопланетных системах и их проявлений в наблюдаемых модуляциях солнечного микроволнового излучения и световых кривых транзитных экзопланет.

В настоящее время большое внимание уделяется изучению явлений в солнечной атмосфере [1, 2]. Различные направления исследований включают в себя изучение колебательных процессов в корональных магнитных петлях [3–5], солнечных пятнах [6, 7], исследования глобальных осцилляций Солнца как газового шара [8, 9]. Большое количество работ посвящено поискам механизма развития солнечных вспышек (например, [10–12]), однако, полная ясность в данном вопросе до сих пор не достигнута, в связи с чем исследования в данном направлении представляются весьма актуальными.

Другим важным вопросом, до сих пор не решенным в современной астрофизике, является поиск источников нагрева солнечной и звездной корон [13], так как в короне отсутствуют видимые источники нагрева, способные объяснить ее быстрый разогрев от десятков тысяч градусов в переходной области до миллионов в более высоких слоях. В настоящее время рассматриваются несколько основных возможных источников нагрева, а именно, нагрев токами [14], нагрев за счет затухания различных типов волн [2, 5], нагрев за счет микровспышек [10, 15]. Однако, все эти механизмы имеют свои ограничения. В частности, для эффективного нагрева корональных магнитных петель токами требуются значения тока $I \geq 10^{15}$ А, в то время как наблюдаемые токи, как правило, не превышают $10^{10} \div 10^{11}$ А. В случае микровспышек до сих пор не установлено, происходят ли они с достаточной частотой для обеспечения нагрева [11]. В случае с волнами различных типов не всегда ясно, является ли скорость их затухания достаточной. Нагрев короны могли бы обеспечить глобальные 5-минутные осцилляции Солнца, несущие большую энергию, однако, они не могут непосредственно проникать в корону, так как обладают недостаточно высокой частотой и отражаются от области температурного минимума [1]. Тем не менее, в работе [9] был предложен механизм, в котором 5-минутные колебания могут проникать в корону благодаря явлению параметрического резонанса.

Таким образом, поиски источников нагрева короны являются одним из приоритетных направлений в современной физике Солнца.

Весьма перспективным в настоящее время представляется также исследование планет, находящихся вне Солнечной системы («экзопланет»). В настоящее время (по состоянию на январь 2012 года) известно уже более 720 экзопланет, и каждую неделю поступают сообщения об открытии все новых, что позволяет сделать вывод о многочисленности планетных систем в нашей Галактике [16]. Несомненно, исследования в этом направлении являются очень актуальными и представляют значительный интерес. В настоящее время широко применяется метод транзитной фотометрии – способ обнаружения экзопланет, основанный на наблюдениях проходов планеты на фоне звезды («транзитов»), впервые примененный при открытии экзопланеты HD 209458b [17] и позволяющий не только обнаруживать сам факт наличия планеты, но и определять некоторые ее свойства. В частности, по поглощению излучения родительской звезды во время транзита возможно определение состава атмосферы планеты [18].

Целью настоящей диссертационной работы является разработка методики обработки записей излучения астрофизических объектов, исследование колебательных процессов в солнечной атмосфере и в системе «звезда-планета» применительно к экзопланетным системам.

1. Адаптация метода Вигнера-Виля применительно к астрофизическим объектам, разработка методики подготовки к обработке и непосредственно обработки записей излучения.
2. Исследование модуляций солнечного излучения различных типов и физических процессов в источниках излучения.
3. Рассмотрение двух механизмов нагрева корональных магнитных петель и оценка их эффективности на основе данных о модуляциях солнечного излучения.
4. Определение параметров транзитных экзопланет и исследование проявлений активности родительских звезд по модуляциям световой кривой.

Научная новизна

1. Разработан новый алгоритм предварительной обработки записей излучения астрофизических объектов с последующим применением метода Вигнера-Виля в сочетании с методом Фурье-анализа со «скользящим окном».

2. Впервые получено подтверждение проявлений параметрического резонанса на 11,7 ГГц, что указывает на проникновение 5-мин осциллирующей скорости фотосферной конвекции высоко в корону. Проведено исследование частоты встречаемости догопериодических линий в низкочастотных спектрах солнечного микроволнового излучения, получены оценки яркостной температуры колебаний. Показано, что развитию вспышки в корональной магнитной петле предшествует резкое увеличение силы тока, текущего в петле, что указывает на важную роль токов в развитии вспышек. Получено хорошее согласование периодов кинк-осцилляций магнитных петель с периодами низкочастотных модуляций в спектрах микроволнового излучения Солнца, указывающее на наличие физической связи между кинк-осцилляциями петель и их микроволновым излучением.
3. Впервые определена плотность энергии медленных магнитозвуковых колебаний в корональных магнитных петлях в случае параметрического резонанса. Показано, что механизм нагрева петель медленными магнитозвуковыми колебаниями позволяет объяснить происхождение горячих рентгеновских петель с температурами $(3 \div 6) \times 10^6$ К. Предложен новый механизм развития микровспышек в корональных магнитных петлях и их детектирования с использованием анализа модуляций микроволнового излучения Солнца, показано, что микровспышки при определенных параметрах петли могут приводить к ее эффективному нагреву.
4. Разработана новая методика исследования звездной активности на основе анализа световых кривых транзитных экзопланет, впервые с применением разработанного алгоритма исследованы световые кривые «Горячего Юпитера» Eхо2b.

Научная и практическая ценность. Полученные результаты представляют интерес для понимания процессов развития солнечных вспышек, нагрева солнечной короны и процессов взаимодействия в системе «звезда-планета». Полученные результаты могут быть использованы для объяснения происхождения горячих рентгеновских магнитных петель в солнечной короне, теоретического объяснения наблюдаемых особенностей в динамических спектрах солнечного микроволнового излучения и определения характеристик экзопланет и их родительских звезд.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Применение предварительной обработки цифровых записей излучения астрофизических объектов и билинейного метода Вигнера-Вилля

в сочетании с методом Фурье-анализа со «скользящим окном» позволяет реализовать спектрально-временной цифровой анализ в широком диапазоне с хорошей временной и частотной разрешающими способностями и минимизировать появление искажений.

2. Проявление линий параметрического резонанса (3,3, 5 и 10 минут) в спектрах микроволнового излучения Солнца на частоте 11,7 ГГц свидетельствует о проникновении 5-минутных колебаний скорости фотосферной конвекции высоко в солнечную корону. Наличие в спектрах микроволнового излучения парных линий с различающимися в два раза частотами является проявлением кинк-осцилляций корональной магнитной петли. Наиболее часто встречающаяся в спектрах долгопериодических осцилляций (20 ÷ 80 мин) модуляционная линия с периодом около 30 минут соответствует крутильной или радиальной моде собственных колебаний солнечных пятен.
3. Развитию вспышки в корональной магнитной петле предшествует резкое увеличение силы тока. Причиной увеличения тока может являться желобковая неустойчивость.
4. В корональных магнитных петлях за счет параметрического резонанса с 5-минутными осцилляциями скорости фотосферной конвекции возбуждаются медленные магнитозвуковые осцилляции, плотность энергии которых достаточна для разогрева «горячих» рентгеновских петель до наблюдаемых температур $(3 \div 6) \times 10^6$ К.
5. Наличие в спектрах солнечного микроволнового излучения модуляции с периодически изменяющейся частотой и периодом ее изменения, близким к 150 секундам, является проявлением микровспышек в корональных магнитных петлях, возникающих за счет взаимодействия 5-минутных фотосферных осцилляций с токонесящими петлями.

Апробация работы. По теме диссертации опубликованы 8 статей в ведущих российских и иностранных научных журналах, входящих в список ВАК, 10 докладов в трудах отечественных и международных конференций, 3 тезиса докладов. Материалы диссертации докладывались и обсуждались на научных семинарах Института прикладной физики РАН, российских и международных конференциях: научная конференция по радиофизике ННГУ (Нижний Новгород, 2008, 2009, 2010), научная школа «Нелинейные волны - 2010» (Нижний Новгород, 2010), Всероссийская ежегодная конференция по физике Солнца (Санкт-Петербург, 2009, 2010), 7th international Workshop on Planetary, Solar and Heliospheric Radio

Emissions (Грац, Австрия, 2010), European planetary science congress (Рим, Италия, 2010), XI Russian-Finnish Symposium on Radio Astronomy (Пуццино, Россия, 2010), European Week of Astronomy and Space Science (Санкт-Петербург, Россия, 2011).

Результаты исследований использовались в грантах РФФИ 08-02-00119-а, 11-02-00103-а, 10-02-00265а, в конкурсном контракте КД НК-21П с Федеральным Агентством Образования Российской Федерации, а также в гранте 228319 в рамках проекта Europlanet RI-FP7.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из Введения, трех глав, Приложения 1, Заключения и списка литературы, включающего и работы автора. Общий объем диссертации составляет 133 страницы, включая 33 рисунка. Список литературы содержит 127 наименований.

Краткое содержание работы

Во **Введении** определены предмет исследований и задачи диссертационной работы, обоснована актуальность тематики, а также приведен обзор публикаций по тематике работы.

В **первой главе** описывается алгоритм обработки данных и его программная реализация, использованные при обработке записей солнечного микроволнового излучения и оптических световых кривых экзопланеты Eхо2b. В главе приводятся основные алгоритмы методов спектрально-временного анализа, а также процессов подготовки цифровых сигналов к анализу. В данной диссертационной работе для обработки записей радиоизлучения Солнца применялось преобразование Вигнера-Виля в сочетании с преобразованием Фурье со «скользящим» окном. Для предварительной обработки данных разработан пакет программ, используемый для предварительной «чистки» сигнала от помех, удаления трендов и среднего, частотной фильтрации различных типов. Новизна предложенной методики заключается в возможности благодаря предложенной улучшенной предварительной обработке избежать появления в спектрах артефактов и искажений и получить спектры с высоким временным и частотным разрешением [19, А6]. Предложенный алгоритм позволяет, например, уверенно выделять в спектрах модуляционные линии с линейной частотной модуляцией, которые практически невозможно обнаружить с применением одного лишь быстрого преобразования Фурье.

Во **второй главе** проведено исследование и теоретическая интерпретация модуляций интенсивности солнечного микроволнового излучения. В разделе 2.1 на примере более 40 событий, наблюдавшихся в обсерватории «Метсахови» на 11,7 ГГц, исследованы долгопериодические осцилляции микроволнового излучения Солнца. Оценена частота появления долгопериодических линий с различными периодами и получен новый результат, согласно которому наиболее часто в низкочастотных спектрах солнечного микроволнового излучения встречается линия с периодом около 30 минут. Показано, что наблюдаемые модуляционные периоды $20 \div 90$ мин могут соответствовать радиальной или крутильной моде колебаний солнечных пятен. Новым результатом является также получение оценок яркостной температуры колебаний. В разделе 2.1 показано, что яркостная температура колебаний в зависимости от уровня активности Солнца может различаться более, чем на порядок. Рис. 1 иллюстрирует зависимость частоты появления колебания от его периода [А2]. Для удобства рассмотрения были выделены два диапазона с периодами $1 \div 12$ (рис. 1а) и $20 \div 95$ (рис. 1б) минут соответственно. Как можно увидеть из рис. 1а, наиболее часто в первом диапазоне встречаются колебания с

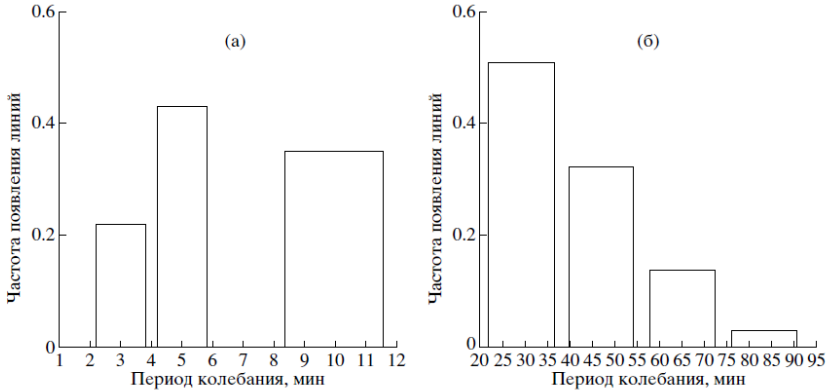


Рис. 1. Частота появления краткопериодических линий (периоды 1 ÷ 12 мин) в излучении Солнца на частоте 11,7 ГГц (а); частота появления долгопериодических линий (периоды 20 ÷ 90 мин) в излучении Солнца на частоте 11,7 ГГц (б)

периодами, близкими к 5 минутам. Как известно, в фотосферной конвекции существует широкий спектр осцилляций скорости, максимум которого приходится на колебания с периодом около 5 мин, что приводит к появлению в спектрах модуляции с соответствующим периодом. Одним из возможных механизмов возбуждения колебаний с периодами около 3 и 10 минут является параметрический резонанс, возникающий в корональных магнитных петлях подходящей длины. При этом 5-минутные фотосферные колебания выступают в роли накачки, и в результате взаимодействия с ними возбуждаются колебания на основной частоте ω , а также субгармоники с частотами $\omega/2$ (10 минут) и $\frac{3}{2}\omega$ (3 минуты). Параметрическая неустойчивость возникает в узких зонах вблизи частот $\omega_n = \frac{n\omega}{2}, n = 1, 2, 3, \dots$, то есть $\omega_1 = \omega/2, \omega_2 = \omega, \omega_3 = \frac{3}{2}\omega, \dots$. В пользу данной гипотезы говорит также соотношение ширин и интенсивностей линий: наибольшей шириной обладает линия субгармоники (10 мин), а наибольшей интенсивностью – линия накачки (5 мин). Это связано с различными условиями возбуждения гармоник при параметрическом резонансе и различной шириной области возбуждения. Ранее параметрический резонанс был обнаружен в низкочастотной модуляции микроволнового излучения на 37 ГГц. Подтверждение проявления параметрического резонанса на частоте 11,7 ГГц свидетельствует о существовании механизма, благодаря которому 5-минутные осцилляции скорости фотосферной конвекции проникают высоко в корону, что может быть особенно важно

для понимания ее нагрева. Во втором диапазоне (рис. 16) не только наибольшую частоту появления, но и наибольшую интенсивность имеют долгопериодические осцилляции с периодами около 35 минут, которые могут быть связаны с колебаниями солнечных пятен как целого. Согласно [6], подходящими периодами обладают крутильная и радиальная моды колебаний солнечных пятен. Полученные оценки показывают, что яркостная температура колебаний в случае вспышечных событий и «спокойного» Солнца может различаться более, чем на порядок, что является новым результатом.

В разделе 2.2 рассматривается необычная предвспышечная модуляция микроволнового излучения в корональных магнитных петлях. Как можно увидеть из рис.2, собственно вспышке предшествуют резкое увеличение и последующий спад частоты модуляции, наблюдаемой в спектре микроволнового излучения. Так как частота собственных LRC-колебаний петли как эквивалентного электрического контура связана с протекающим в петле током [20, A5]

$$\nu_{LRC} = \frac{c}{2\pi\sqrt{LC(I_0)}} \approx \frac{1}{(2\pi)^{2/3}\sqrt{\Lambda}} \frac{I_0}{cr_2^2\sqrt{n_2m_i}}, \quad (1)$$

данный результат свидетельствует о том, что развитию вспышки в магнитной петле предшествует резкое, в несколько раз, увеличение силы тока. В уравнении (1) Λ - параметр, определяемый геометрическими характеристиками петли, n_2 , r_2 , l_2 - электронная концентрация, радиус и длина корональной части петли, I_0 - протекающий в петле ток, L и C - индуктивность и емкость петли соответственно, c - скорость света, m_i - масса иона. Повышенная диссипация тока приводит к резкому увеличению энерговыделения и, в конечном итоге, к возникновению вспышки. В разделе показано, что причиной резкого увеличения тока перед вспышкой может являться желобковая неустойчивость. Данный результат свидетельствует о важной роли тока в развитии солнечных вспышек, механизм возникновения которых до сих пор окончательно не изучен.

В разделе 2.3 обсуждаются возможные проявления кинк-осцилляций корональных магнитных петель в солнечном микроволновом излучении. Как известно [4], крупномасштабные кинк-осцилляции корональных магнитных петель (КМП) сопровождаются периодическим увеличением магнитного поля в основаниях петли дважды за период. Так как формула для интенсивности микроволнового излучения КМП дает относительно сильную зависимость интенсивности от магнитного поля и существенную угловую анизотропию излучения [4], при определенном расположении петли наблюдатель будет наряду с возникающими за счет движения диаграммы направленности осцилляциями на основной частоте кинк-осцилляций

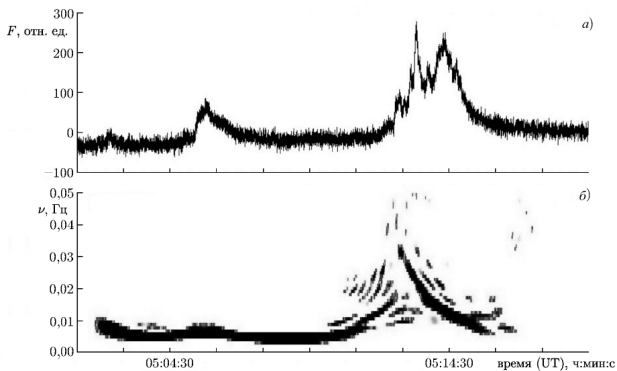


Рис. 2. Событие 30 марта 2001 года: интенсивность микроволнового излучения по наблюдениям спектрополяриметра «Нобейма» на 17 ГГц (а); спектр низкочастотной модуляции микроволнового излучения, полученный с использованием преобразования Вигнера-Виля (б)

$\nu_0 = 1/P_{osc}$ наблюдать также модуляцию на двойной частоте $2\nu_0$. Следовательно, обнаружение таких модуляционных пар позволяет получить информацию о кинк-осцилляциях КМП. В разделе 2.3 первое проведено сравнение проявлений кинк-осцилляций КМП в различных диапазонах, а именно, наблюдений на частотах 11,7 и 37 ГГц и наблюдений спутника TRACE в ультрафиолете. Получено хорошее согласование наблюдаемых периодов и обнаружено большое количество модуляционных пар, что указывает на наличие связи геометрических кинк-осцилляций с модуляциями микроволнового излучения [A4, A20].

Третья глава диссертационной работы посвящена изучению проблемы нагрева корональных магнитных петель. В рамках данной главы обсуждаются такие возможные механизмы нагрева КМП, как нагрев при параметрическом возбуждении звуковых колебаний в корональных магнитных петлях, а также нагрев корональных магнитных петель за счет микровспышек.

Предложенный в [9] механизм, объясняющий особенности модуляций по наблюдениям на частоте 37 ГГц, был подтвержден также по наблюдениям на частоте 11,7 ГГц [A1]. Основные результаты данной работы представлены в разделе 3.1. Подтверждение проявления параметрического резонанса на частоте 11,7 ГГц свидетельствует о существовании механизма, благодаря которому 5-минутные осцилляции проникают высоко в корону, что может быть важно для понимания ее нагрева. Как показано в [9, A1], в результате взаимодействия токнесущей петли с 5-мин осцилляциями

скорости фотосферной конвекции скорость звука в петле будет иметь периодическую модуляцию с периодом 5-минутных осцилляций. С учетом этого, уравнение для медленных магнитозвуковых колебаний принимает вид уравнения Матвеева, описывающего параметрическую неустойчивость.

Как уже упоминалось выше, параметрическая неустойчивость возникает в узких зонах вблизи частот $\omega_n = \frac{n\omega}{2}, n = 1, 2, 3, \dots$, где в качестве накачки с частотой ω выступают 5-мин осцилляции. В силу более жестких условий возбуждения более высоких гармоник колебания с частотами, большими $\frac{3\omega}{2}$, в спектрах практически не наблюдаются.

В разделе 3.1, а также в [А3], оценена средняя плотность энергии медленных магнитозвуковых волн, возбуждаемых в корональных магнитных петлях в условиях параметрического резонанса. Она определяется невозмущенными значениями скорости звука и силы тока в КМП, ее геометрическими характеристиками, а также глубиной модуляции тока. Оценку глубины модуляции тока можно получить из наблюдательных данных, используя формулу (1). Согласно проведенному анализу, в большинстве случаев она составляет от одного до нескольких процентов.

Используя выражения для плотности энергии медленных магнитозвуковых колебаний и скорости их диссипации, в разделе получены оценки для функции нагрева. В разделе 3.1 приводятся оценки для различных слагаемых декремента затухания медленных магнитозвуковых волн, обусловленных проводимостью, вязкостью и теплопроводностью. Оценка этих слагаемых показывает, что основной вклад в диссипацию ионного звука вносит электронная теплопроводность. Исходя из скорости диссипации и средней плотности энергии звуковых волн, в разделе получены оценки для функции нагрева, обусловленной данным механизмом. Необходимое условие нагрева заключается, очевидно, в том, чтобы функция нагрева превышала радиационные потери из корональной магнитной петли. В разделе 3.1 с учетом функции радиационных потерь показано, что достаточный нагрев КМП за счет диссипации медленных магнитозвуковых волн возможен в случае, когда электрический ток через поперечное сечение петли превышает 10^{10} А.

Таким образом, параметрический резонанс становится эффективным источником нагрева плазмы, если электрический ток в петле превышает некоторое критическое значение, и если собственная частота ее звуковых колебаний близка к половинной частоте накачки. Последнее условия требует «резонансной» длины петли $2 \times 10^9 \text{ см} \leq l \leq 2 \times 10^{10} \text{ см}$. Как впервые показано в диссертационной работе, предложенный механизм может объяснить температуры существующих в солнечной короне горячих петель с характерными длинами и температурами $3 \div 6 \times 10^6 \text{ К}$, наблюдавшихся

спутником Yohkoh.

В разделе 3.2 рассмотрен иной механизм нагрева корональных магнитных петель, связанный с микровспышками, то есть вспышками, во время которых выделяется энергия, на несколько порядков меньшая энергии обычных вспышек. Однако, в то время как вспышки – явление относительно редкое, микровспышки наблюдаются с гораздо большей частотой. Таким образом, небольшая энергия микровспышек компенсируется их большим количеством, и они, в принципе, могут вносить вклад в процесс нагрева короны. Предложен следующий механизм взаимодействия акустических 5-минутных колебаний и корональной петли, приводящий к возникновению микровспышек: так как скорость фотосферной конвекции промодулирована 5-минутными колебаниями, и так как электродвижущая сила в основаниях петли пропорциональна амплитуде скорости фотосферной конвекции, 5-минутную модуляцию получает также текущий в КМП ток. Так как продольное электрическое поле связано с вариациями тока и пропорционально его производной, периодически изменяющийся ток порождает электрическое поле, осциллирующее с тем же периодом. В разделе 3.2 получено выражение для среднего за половину периода электрического поля. Данное поле имеет составляющую, параллельную магнитному полю, и способно приводить к ускорению электронов. Как известно, количество электронов, включающихся в процесс ускорения, напрямую зависит от соотношения ускоряющего электрического поля и поля Драйсера $E_D = e\Lambda\omega_p^2/V_T^2$, где $V_T = \sqrt{k_B T/m_e}$ - тепловая скорость электронов, Λ - кулоновский логарифм, ω_p - ленгмюровская частота. Если $E_{||} < E_D$, то есть ускоряющее поле не превышает поле Драйсера, в ускорительный процесс или убегание включаются электроны со скоростями $V > (E_D/E_{||})^{1/2}V_T$. Так как поле Драйсера принимает наименьшее значение в вершине петли, электроны, находящиеся в этой области, будут ускоряться наиболее эффективно.

Ускоренные электроны движутся от вершины петли к ее основаниям, где в результате столкновений передают свою энергию окружающей плазме, что приводит к ее нагреву. Данный процесс и наблюдается как микровспышка. В разделе 3.2 получены оценки для максимальной энергии, которую набирает одиночный электрон в таких условиях, вычислено общее количество ускоренных электронов, возникающих в разных областях петли и оценена их общая энергия.

Так как модуль электрического поля, возникающего за счет взаимодействия петли с фотосферной конвекцией, достигает максимума дважды за период, микровспышки наблюдаются с периодом, в два раза меньшим периода 5-минутных колебаний, то есть около 150 секунд. На примере

данных, записанных обсерваториями «Нобейма» и «Метсахови», показано, что характерные проявления микровспышек с указанными периодами (повышение и понижение частоты модуляции с периодом 150 с вне зависимости от уровня активности) действительно присутствуют в спектрах большинства наблюдаемых событий. Согласно полученным оценкам, данный механизм может в случае небольших давлений в петле полностью компенсировать или превысить потери на излучение из петли и не требует ее «резонансной» длины [A10].

Вполне вероятно также, что оба предложенных в главе 3 механизма могут действовать также на звездах поздних спектральных классов. В **Приложении 1** обсуждаются возможности определения параметров экзопланетных систем путем анализа наблюдений транзитных экзопланет. В разделе рассматривается возможность изучения активности звезды спектрального класса G7V, связанной с планетой Eo2b, обращающейся по очень близкой к своей звезде орбите. Как показано в разделе, после применения ряда программ, описанных в главе 1 диссертационной работы, а также в работах [A6, A7], по шуму транзитных импульсов возможно исследование астросейсмической активности звезд путем наблюдений прохождений планет через их диски. В частности, наблюдаемые искажения световой кривой могут свидетельствовать о неравномерном свечении диска звезды, то есть о проявлении активности.

В **Заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы.

Основные результаты диссертационной работы.

1. Предложен новый алгоритм обработки данных, включающий в себя предварительную подготовку записей излучения (удаление трендов и среднего, «чистку» сигнала от спектральных составляющих инструментального происхождения) с последующим спектрально-временным анализом с применением билинейного метода Вигнера-Вилля в сочетании с методом Фурье-анализа со «скользящим окном». Показана возможность широкого применения предложенного алгоритма в астрономии для анализа данных в различных диапазонах длин волн. В частности, в диссертационной работе алгоритм был использован для анализа микроволнового излучения различных солнечных объектов, а также для исследования световых кривых экзопланеты Eo2b.
2. Исследованы модуляции микроволнового излучения Солнца в диапазоне 20 ÷ 80 минут. Показано, что в данном диапазоне наиболее часто встречается линия с периодом около 30 минут, которая может

быть объяснена как радиальная или крутильная мода собственных колебаний солнечных пятен. Показано, что яркостная температура осцилляций в случае вспышечных событий более чем на порядок превосходит аналогичную температуру осцилляций «спокойного» Солнца. В диапазоне $3 \div 10$ минут наиболее часто встречаются колебания с периодами 3,3, 5 и 10 минут. Соотношение ширины и интенсивностей линий свидетельствует о том, что данные линии являются проявлением параметрического резонанса в солнечной короне, когда взаимодействие глобальных 5-минутных осцилляций скорости фотосферной конвекции с корональными магнитными петлями приводит к возбуждению в последних медленных магнитозвуковых волн. Обнаружение характерных для параметрического резонанса линий в модуляции излучения на частоте 11,7 ГГц свидетельствует о том, что данный механизм позволяет 5-минутным фотосферным осцилляциям проникать высоко в корону.

3. На основе анализа данных спутника TRACE и обсерватории «Метсахови» показано наличие связи между крупномасштабными кинк-осцилляциями корональных магнитных петель и модуляционными парами, обнаруженными в низкочастотных спектрах микроволнового излучения. При этом в спектрах микроволнового излучения присутствуют линии с частотой, совпадающей с основной частотой кинк-осцилляций, и превышающей ее в два раза. Данную особенность можно использовать для детектирования петель, в которых кинк-осцилляции инициируются вспышкой, по данным микроволнового излучения.
4. Проведена диагностика текущих в корональных магнитных петлях токов по данным о низкочастотной модуляции солнечного микроволнового излучения. Показано, что развитию солнечных вспышек в магнитных петлях предшествует резкое (в несколько раз) увеличение силы тока, приводящее к дополнительному прогреву петли. Данный результат указывает на важную роль токов в развитии солнечных вспышек. В качестве возможной причины резкого усиления тока может выступать желобковая неустойчивость.
5. Исследован особый тип КМП, находящихся в режиме параметрического резонанса с 5-минутными осцилляциями скорости фотосферной конвекции. Это приводит к возбуждению медленных магнитозвуковых колебаний в петлях с «резонансными» длинами $2 \times 10^9 \text{ см} \leq l \leq 2 \times 10^{10} \text{ см}$ и к сильному дополнительному нагреву таких петель. Показано, что эффект параметрического резонанса в короне может объяснить существование наблюдавшихся спутником

Уголков горячих рентгеновских петель с температурой $3 \div 6$ миллионов градусов, существенно превышающей температуру окружающей короны ($1 \div 2$ миллиона градусов).

6. Показано, что в результате взаимодействия 5-минутных осциллирующей скорости фотосферной конвекции с токнесущими петлями происходит модуляция электрического тока, текущего в петле и, как следствие, генерация индукционного электрического поля. Это приводит к появлению группы убегающих электронов вблизи вершины петли, где поле Драйзера минимально. Когда ускоренные электроны достигают оснований петли, наблюдается микровспышка. Показано, что в зависимости от параметров петли за счет микровспышек возможна полная компенсация радиационных потерь, а также превышение нагрева над потерями на излучение.
7. Разработана новая методика исследования звездной активности на основе анализа световых кривых транзитных экзопланет. Выполнена предварительная и итоговая обработка световых кривых экзопланеты *Ехо2b* по наблюдениям спутника *Corot*. Показана возможность исследования звездной активности с использованием наблюдений транзитных экзопланет.

В диссертационную работу не вошли результаты исследования взаимодействия «Горячего Юпитера» HD 209458b с потоком набегающего звездного ветра, опубликованные в работах [A8, A9].

Список работ по теме диссертации

- [A1] В. В. Зайцев, А. Г. Кисляков, К. Г. Кислякова. Параметрический резонанс в солнечной короне // *Космические исследования*. — 2008. — Т. 46, № 4. — С. 310–347.
- [A2] К. Г. Кислякова, В. В. Зайцев, С. Урто, А. Рихокайнен. Долгопериодические осцилляции микроволнового излучения Солнца // *Астрономический журнал*. — 2011. — Т. 88, № 3. — С. 303–312.
- [A3] В. В. Зайцев, К. Г. Кислякова. Нагрев плазмы при параметрическом возбуждении звуковых колебаний в корональных магнитных петлях // *Астрономический журнал*. — 2010. — Т. 87, № 4. — С. 410–416.
- [A4] M. L. Khodachenko, K. G. Kislyakova, T. V. Zagorashvili, A. G. Kislyakov, M. Panchenko, V. V. Zaitsev. Possible manifestation of large-scale transverse oscillations of coronal loops in solar microwave emission // *Astronomy and Astrophysics*. — 2011. — V. 525. — P. A105.

- [A5] В. В. Зайцев, К. Г. Кислякова, А. Т. Алтынцев, Н. С. Мешалкина. Необычная предвысшыпечная модуляция микроволнового излучения корональных магнитных петель // *Известия вузов. Радиофизика.* — 2011. — Т. 54, № 4. — С. 243–259.
- [A6] А. Г. Кисляков, Е. И. Шкелев, С. Ю. Лупов, К. Г. Кислякова. Параметры астрофизических объектов по данным о модуляции интенсивности их электромагнитного излучения. I. Алгоритмы обработки данных наблюдений // *Вестник Нижегородского университета им. Н.И.Лобачевского.* — 2011. — Т. 2, № 1. — С. 46–54.
- [A7] А. Г. Кисляков, В. В. Зайцев, Е. И. Шкелев, К. Г. Кислякова. Параметры астрофизических объектов по данным о модуляции интенсивности их электромагнитного излучения. II. Результаты наблюдений // *Вестник Нижегородского университета им. Н.И.Лобачевского.* — 2011. — Т. 4, № 1. — С. 76–88.
- [A8] H. Lammer, K. G. Kislyakova, M. Holmström, M. L. Khodachenko, M. Griessmeier. Hydrogen ENA-cloud observation and modeling as a tool to study star-planet interaction // *Astrophys. Space Sci.* — 2011. — V. 335. — P. 9-23.
- [A9] H. Lammer, V. Eybl, K. G. Kislyakova, J. Weingrill, M. Holmström, M. L. Khodachenko, Yu. N. Kulikov, A. Reiners, M. Leitzinger, P. Odert, M. Xiangruess, B. Dorner, M. Güdel, A. Hanslmeier. UV transit observations of EUV-heated expanded thermospheres of Earth-like exoplanets around M-stars: Testing atmosphere evolution scenarios // *Astrophys. Space Sci.* — 2011. — V. 335. — P. 39-50.
- [A10] К. Г. Кислякова. Проявление микровспышек в модуляции микроволнового излучения корональных магнитных петель // *Известия вузов. Радиофизика.* — 2011. — Т. 54, № 11. — С. 799–815.
- [A11] В. В. Зайцев, К. Г. Кислякова. Параметрический резонанс в солнечной короне // *Труды XII научной конференции по радиофизике, посвященной 90-летней годовщине со дня рождения М.М.Кобрин (Нижний Новгород, 7 мая 2008 г.)* — Издательство ННГУ, Нижний Новгород, 2008. — С. 35–36.
- [A12] В. В. Зайцев, К. Г. Кислякова. Долгопериодические осцилляции микроволнового излучения Солнца // *Труды XIII научной конференции по радиофизике в 2009 году, посвященной 85-летию со дня рождения М.А. Миллера (Нижний Новгород, 13 мая 2009 г.)* — Издательство ННГУ, Нижний Новгород, 2009. — С. 31–32.
- [A13] В. В. Зайцев, К. Г. Кислякова. Нагрев плазмы при параметрическом возбуждении звуковых колебаний в корональных магнитных петлях // *Труды Всероссийской ежегодной конференции по физике Солнца (Санкт-Петербург, Пулково, 5-11 июля 2009 г.)* — Санкт-Петербург: изд-во СПбГУ, 2009. — С. 187–191.

- [A14] В. В. Зайцев, К. Г. Кислякова. Нагрев плазмы при параметрическом возбуждении звуковых колебаний в корональных магнитных петлях // *Труды XV Научной школы «Нелинейные волны - 2010» (Нижний Новгород, 6-12 марта 2010 г.)* — Изд-во ИПФ РАН, Нижний Новгород, 2010. — С. 22.
- [A15] А. Г. Кисляков, С. Ю. Лупов, М. Л. Ходоченко, К. Г. Кислякова, Х. Ламмер. Программы анализа вариаций света звёзд с целью поиска планет // *Труды XIV научной конференции по радиофизике в 2009 году, посвященной 80-й годовщине со дня рождения Ю.Н.Бабанова (Нижний Новгород, 7 мая 2010 г.)* — Издательство ННГУ, Нижний Новгород, 2010. — С. 144–146.
- [A16] А. Г. Кисляков, С. Ю. Лупов, М. Л. Ходоченко, К. Г. Кислякова, Х. Ламмер. Активность звезды G7V, связанная с планетой Eo2 // *Труды XIV научной конференции по радиофизике в 2009 году, посвященной 80-й годовщине со дня рождения Ю.Н.Бабанова (Нижний Новгород, 7 мая 2010 г.)* — Издательство ННГУ, Нижний Новгород, 2010. — С. 146–148.
- [A17] K. G. Kislyakova, A. G. Kislyakov, M. L. Khodachenko, H. Lammer, V. V. Zaitsev, S. Yu. Lupov. Combined Sliding-Window Fourier (SWF) and Wigner-Ville (WV) algorithm // *Труды XIV научной конференции по радиофизике в 2009 году, посвященной 80-й годовщине со дня рождения Ю.Н.Бабанова (Нижний Новгород, 7 мая 2010 г.)* — Издательство ННГУ, Нижний Новгород, 2010. — С. 356–357.
- [A18] V. V. Zaitsev, K. G. Kislyakova. Plasma heating by the parametric excitation of acoustic waves in coronal magnetic loops // *Proc. of the 7th international Workshop on Planetary, Solar and Heliospheric Radio Emissions (Graz, Austria, September 15-17, 2010)*. — Austrian Academy of Sciences Press, ed. H. O. Rucker — 2011. — P. 445-453.
- [A19] K. G. Kislyakova, A. G. Kislyakov, M. L. Khodachenko, H. Lammer, V. V. Zaitsev, S. Yu. Lupov. Programs of stellar light curves analysis in the purpose of extrasolar planet search // *European planetary science congress 2010 (EPSC2010) (September 19–24 2010, Rome, Italy)*. — 2010. — EPSC Abstracts, Vol.5. — EPSC2010-240.
- [A20] M. L. Khodachenko, A. G. Kislyakov, K. G. Kislyakova, T. V. Zaqarashvili, M. Panchenko, V. V. Zaitsev, O. V. Arkhypov, H. O. Rucker Long-periodic transverse oscillations of coronal loops and modulations of solar microwave radiation // *Proc. of the 7th international Workshop on Planetary, Solar and Heliospheric Radio Emissions (Graz, Austria, September 15-17, 2010)*. — Austrian Academy of Sciences Press, ed. H. O. Rucker — 2011. — P. 435-443.
- [A21] В. В. Зайцев, К. Г. Кислякова, А. Т. Алтынцева, Н. С. Мешалкина. Об эффекте сильного возрастания электрического тока в корональных магнитных петлях во время солнечных вспышек // *Труды Всероссийской*

ежегодной конференции по физике Солнца (Санкт-Петербург, Пулково, 3-9 октября 2010 г.) — Санкт-Петербург: изд-во СПбГУ, 2010. — С. 151–154.

- [A22] K. G. Kislyakova, V. V. Zaitsev. Coronal loop plasma heating driven by parametric resonance with p-modes // *XI Russian-Finnish Symposium on Radio Astronomy (October 18 - 22, 2010, Pushchino, Moscow region, Russia)*. Abstracts — P. 24.
- [A23] K. G. Kislyakova, V. V. Zaitsev. Long-periodic oscillations of solar microwave emission at 11.7 GHz // *XI Russian-Finnish Symposium on Radio Astronomy (October 18 - 22, 2010, Pushchino, Moscow region, Russia)*. Abstracts — P. 24.

Список литературы

- [1] Э. Прист. *Солнечная магнитогидродинамика*: М.: Мир (1985), стр. 303.
- [2] M. J. Aschwanden. *Physics of the Solar Corona. An Introduction with Problems and Solutions (2nd edition)* (2005).
- [3] V. M. Nakariakov, E. Verwichte. *Coronal Waves and Oscillations* // Living Reviews in Solar Physics, **2**, pp. 3 (2005).
- [4] M. L. Khodachenko, V. V. Zaitsev, A. G. Kislyakov, A. V. Stepanov. *Equivalent Electric Circuit Models of Coronal Magnetic Loops and Related Oscillatory Phenomena on the Sun* // Space Science Reviews, **149**, pp. 83–117 (2009).
- [5] V. M. Nakariakov. *MHD oscillations in solar and stellar coronae: Current results and perspectives* // Advances in Space Research, **39**, pp. 1804–1813 (2007).
- [6] А. А. Соловьев, Е. А. Киричек. *Солнечное пятно как уединенная магнитная структура: устойчивость и колебания* // *Астрофизический бюллетень*, **63**, 2, стр. 180–192 (2008).
- [7] V. Smirnova, A. Riekhainen, V. Ryzhov, A. Zhiltsov, J. Kallunki. *Long-period oscillations of millimeter emission above sunspots* // *Astronomy and Astrophysics*, **534**, pp. A137+ (2011).
- [8] A. G. Kislyakov, V. V. Zaitsev, A. V. Stepanov, S. Urpo. *On the Possible Connection between Photospheric 5-Min Oscillation and Solar Flare Microwave Emission* // *Solar Physics*, **233**, pp. 89–106 (2006).
- [9] В. В. Зайцев, А. Г. Кисляков. *Параметрическое возбуждение звуковых колебаний в корональных магнитных петлях* // *Астрономический журнал*, **83**, 10, стр. 921–931 (2006).
- [10] J. W. Brosius, G. D. Holman. *Observations of the Thermal and Dynamic Evolution of a Solar Microflare* // *The Astrophysical Journal*, **692**, pp. 492–501 (2009).

- [11] M. J. Aschwanden, R. A. Stern, M. Güdel. *Scaling Laws of Solar and Stellar Flares* // The Astrophysical Journal, **672**, pp. 659–673 (2008).
- [12] K. Shibasaki. *High-Beta Disruption in the Solar Atmosphere* // The Astrophysical Journal, **557**, pp. 326–331 (2001).
- [13] M. J. Aschwanden. *Keynote address: Outstanding problems in solar physics* // Journal of Astrophysics and Astronomy, **29**, pp. 3–16 (2008).
- [14] D. S. Spicer. *Heating by Field Aligned DC Joule Dissipation* // Mechanisms of Chromospheric and Coronal Heating, pp. 547 (1991).
- [15] U. Narain, K. Pandey. *Nanoflares and Heating of the Solar Corona* // Journal of Astrophysics and Astronomy, **27**, pp. 93–100 (2006).
- [16] D. A. Caldwell, et al. *Instrument Performance in Kepler’s First Months* // The Astrophysical Journal Letters, **713**, pp. L92–L96 (2010).
- [17] G. W. Henry, G. W. Marcy, R. P. Butler, S. S. Vogt. *A Transiting «51 Peg-like» Planet* // The Astrophysical Journal, **529**, pp. L41–L44 (2000).
- [18] L. Fossati, S. Bagnulo, A. Elmasli, C. A. Haswell, S. Holmes, O. Kochukhov, E. L. Shkolnik, D. V. Shulyak, D. Bohlender, B. Albayrak, C. Froning, L. Hebb. *A Detailed Spectropolarimetric Analysis of the Planet-hosting Star WASP-12* // The Astrophysical Journal, **720**, pp. 872–886 (2010).
- [19] Е. И. Шкелев, А. Г. Кисляков, С. Ю. Лупов. *Методы ослабления эффектов интермодуляции в распределении Вигнера-Виля* // Изв. вузов. Радиофизика, **45**, 5, стр. 433–442 (2002).
- [20] В. В. Зайцев, А. В. Степанов. *Корональные магнитные арки* // Успехи физических наук, **178**, 11, pp. 1165–1204 (2008).

Оглавление диссертации

Введение	4
Глава 1. Алгоритмы обработки и анализа данных наблюдений излучения астрофизических объектов	21
1.1. Алгоритмы подготовки данных и алгоритмы спектрально-временного анализа, применявшиеся в данной диссертационной работе	21
1.1.1 Этап подготовки данных наблюдений к обработке	23
1.1.2 Алгоритмы спектрально-временного анализа	29
1.2. Выводы	31
Глава 2. Исследование модуляций интенсивности солнечного микроволнового излучения	32
2.1. Долгопериодические осцилляции микроволнового излучения Солнца как проявление осцилляций солнечных пятен	33
2.1.1 Данные наблюдений	34
2.1.2 Обсуждение результатов	40
2.2. Необычная предвыпешечная модуляция микроволнового излучения в корональных магнитных петлях	46
2.2.1 Данные наблюдений	47
2.2.2 Анализ происхождения низкочастотной модуляции	58
2.2.3 Обсуждение результатов	64
2.3. Возможные проявления кинк-осцилляций корональных магнитных петель в солнечном микроволновом излучении	67
2.4. Выводы	69
Глава 3. Параметрический резонанс и проблема нагрева корональных магнитных петель	72
3.1. Нагрев плазмы при параметрическом возбуждении звуковых колебаний в корональных магнитных петлях	73
3.1.1 Параметрический резонанс	73
3.1.2 Энергия звуковых колебаний	81
3.1.3 Диссипация звуковых колебаний: функция нагрева	84
3.1.4 Нагрев корональных магнитных петель	86
3.1.5 Обсуждение результатов	88
3.2. Нагрев плазмы солнечной короны за счет выделения энергии при микровспышках	91
3.2.1 Данные наблюдений	92
3.2.2 Взаимодействие КМП с 5-минутными фотосферными осцилляциями как возможный механизм ускорения электронов в КМП	95
3.2.3 Обсуждение результатов	104
3.3. Выводы	106
Приложение 1. Определение параметров экзопланетных систем путем анализа наблюдений транзитных экзопланет	108
Заключение	114
Список литературы	117

КИСЛЯКОВА Кристина Георгиевна

**АНАЛИЗ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПО МОДУЛЯЦИЯМ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ**

Автореферат

Ответственный за выпуск
К. Г. Кислякова

Подписано к печати . .2012
Формат $60 \times 84 \frac{1}{16}$. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз. Заказ № ??(2012).

Отпечатано в типографии Нижегородского государственного университета
603000, г. Н. Новгород, ул. Б. Покровская, 37