

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
СПЕЦИАЛЬНАЯ АСТРОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ

На правах рукописи

УДК 523.98

КАЛЬТМАН Татьяна Ильинична

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ МАГНИТОСФЕР
АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ НА СОЛНЦЕ

(специальность 01.03.02 – астрофизика, радиоастрономия)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Н.Архыз - С.Петербург
2000

Работа выполнена в Специальной астрофизической обсерватории
Российской Академии наук.

Научный руководитель — доктор физико-математических наук
А.Н.Коржавин

Официальные оппоненты — доктор физико-математических наук
В.Н. Боровик (ГАО, г. Санкт-Петербург)
доктор физико-математических наук
Е.Я. Злотник (ИПФАН, г. Нижний Новгород)

Ведущая организация: Институт солнечно-земной физики
СО РАН, г. Иркутск

Защита состоится "...." ноября 2000 г. в "...." час. на заседании
Диссертационного совета (шифр Д 003.35.01) в Специальной
астрофизической обсерватории РАН по адресу: 369167, Россия,
пос. Нижний Архыз, САО РАН.

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью
учреждения, просим направлять по вышеуказанному адресу на имя
ученого секретаря совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
Специальной астрофизической обсерватории РАН.

Автореферат разослан "...." октября 2000 г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета Д 003.35.01
кандидат физико-математических наук

Е.К.Майорова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность Ближайшая к Земле звезда, Солнце оказывает определяющее влияние на нашу планету. В короне Солнца происходят ярко выраженные процессы энерговыделения и переноса энергии. Эти явления могут быть как достаточно быстрыми (вспышечно-подобными), так и длительными, все они так или иначе отражаются в солнечно-земных связях. С научной точки зрения Солнце представляет огромный интерес как уникальная космическая лаборатория, в которой происходят плазменные процессы при условиях и масштабах, невозпроизводимых в земных физических лабораториях, а близкое расположение Солнца делает их удобными для детальных наблюдений. Ускорение частиц, нагрев плазмы, эжекции массы и значительные изменения магнитного поля в солнечной короне достаточно ярко отражаются в микроволновом излучении, которое является эффективным средством диагностики плазмы короны. Обширный наблюдательный материал, накопленный за годы регулярных солнечных наблюдений, содержит данные о параметрах корональной плазмы, а также об ускорении частиц и их динамике, нагреве плазмы, о переносе энергии и об энерговыделении в короне. Сравнение результатов модельных расчетов с данными радионаблюдений Солнца, с привлечением также оптических, ультрафиолетовых и рентгеновских наблюдательных данных, позволяет развить методы диагностики корональной плазмы. Особенно интересным представляется исследовать вспышечные явления, параметры радиоизлучения которых свидетельствуют о наличии нетепловых частиц.

Наблюдения на радиотелескопах с высоким пространственным разрешением (РАТАН-600, ССРТ, радиогелиограф в Nobeyama) предоставляют возможность детально исследовать структуру источников радиоизлучения активных областей на Солнце. Новые наблюдательные данные выявили необходимость развития модельных теоретических представлений о происходящих физических процессах в активных областях.

Требуется дальнейшего модельного исследования "магнитосфера" активной области, концепция которой, разработанная пулковской группой радиоастрономов, получила международное признание как пространство в атмосфере Солнца, где параметры плазмы, ее структура, значе-

ние магнитного поля, процессы энергоснабжения определяются и регулируются взаимодействием корональной плазмы с магнитными полями, являющимися продолжением фотосферных магнитных полей активной области. Эта концепция базируется на разработанных ранее в САО и ГАО РАН на основе микроволновых наблюдений Солнца на радиотелескопах БПР и РАТАН-600 прямых количественных методах измерения магнитного поля и выявления нетепловых процессов в солнечной короне. Эта концепция подтверждается также данными наблюдений на крупных радиотелескопах СССР, VLA и WSRT, а также на спутниках SOHO, Yohkoh и TRACE в ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах.

Для моделирования радиоизлучения магнитосфер активных областей требуется разработка усовершенствованных методик расчета, учитывающих как последние теоретические разработки происходящих на Солнце процессов излучения, так и полученные за последние годы экспериментальные данные наблюдений на инструментах с высоким пространственным разрешением и перекрытием широкого спектрального диапазона.

В данной работе проведено трехмерное компьютерное моделирование радиоизлучения отдельных структурных компонентов магнитосферы активных областей на Солнце с помощью разработанных автором компьютерных программ. Такое моделирование позволило уточнить спектрально-поляризационные и пространственные характеристики радиоизлучения таких компонентов магнитосферы, как гало, пекулярный и флоккулярный источники, пятенные источники, источники микроволновых всплесков; учесть вклад тепловых и нетепловых механизмов излучения; выявить некоторые характерные свойства, учет которых необходим при обработке и интерпретации наблюдений активных областей на Солнце.

Основными целями работы являются:

- Компьютерное моделирование радиоизлучения различных элементов магнитосферы активных областей в короне на Солнце: пятенных и флоккулярных радиоисточников, гало, пекулярных источников, источников микроволновых всплесков. Построение

двумерных карт распределения интенсивности и поляризации моделируемых источников радиоизлучения, а также распределений тех же характеристик излучения, сглаженных с одномерной диаграммой направленности радиотелескопов.

- Сравнение результатов модельных расчетов с данными, полученными при наблюдении активных областей на Солнце на радиотелескопах РАТАН-600, БПР, ССРТ и с наблюдательными данными других обсерваторий, в том числе данных со спутников SOHO, Yohkoh и TRACE в ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах.
- Определение параметров тепловой и нетепловой составляющих магнитосфер активных областей (температуры и электронной концентрации, магнитного поля) с помощью модельных методов диагностики, развитие модельных представлений различных структурных элементов магнитосферы и оценка их вклада в общее радиоизлучение активных областей. Проведение ряда компьютерных расчетов разработанных моделей с вариацией задаваемых параметров и анализ полученных результатов.

Научная новизна работы Получены новые результаты по структуре микроволнового излучения некоторых активных областей на Солнце по наблюдениям на РАТАН-600, анализ которых позволил уточнить спектрально-поляризационные и пространственные характеристики излучения отдельных структурных элементов этих областей. Найдены наблюдательные подтверждения существования длительных нетепловых процессов в солнечной короне (даже в период глубокого минимума солнечной активности 1996 г.)

По полученным наблюдательным данным было проведено компьютерное моделирование радиоизлучения компонентов магнитосферы, таких как пятенные источники, пекулярный и флоккулярный источники, гало, источники микроволновых всплесков. Такое моделирование позволило определить параметры тепловой и нетепловой составляющих

(температуру и электронную концентрацию, магнитное поле), развить модельные представления различных структурных элементов магнитосферы и оценить их вклад в общее радиоизлучение активных областей.

Обнаружен эффект самоинверсии знака круговой поляризации в источниках типа "гало" и его интерпретация подтверждена компьютерными расчетами.

Уточнен физический смысл определения величины магнитного поля над пятнами по наблюдениям на РАТАН-600 как максимального значения магнитного поля в основании солнечной короны. Впервые надежно измерено магнитное поле по второй гармонике гирочастоты над некоторыми пятнами, при этом выявлено заметное расхождение с измерениями по третьей гармонике для тех же источников.

Определена высота основания короны над несколькими одиночными пятнами по предложенному автором методу с использованием радиоастрономических и магнитографических наблюдений.

Научное и практическое значение

Создан пакет программ, позволяющий моделировать трехмерную структуру различных компонент магнитосферы активной области и рассчитывать их радиоизлучение с учетом совместного действия трех механизмов: теплового тормозного, теплового гирорезонансного и нетеплового гиросинхротронного. Компьютерное моделирование наблюдаемых источников радиоизлучения позволяет с помощью этих программ и теоретических представлений о природе излучения данных источников уточнять физические параметры области излучения, оценивать вклад тепловой и нетепловой составляющих, что продемонстрировано на примерах наблюдений конкретных активных областей.

Сделан вывод о необходимости учета процессов рассеяния радиоизлучения при его распространении через материю гало, приводящее к замыканию как самого гало, так и нижерасположенных источников. Такой учет необходимо иметь в виду при обработке и интерпретации, например, пятенных и пекулярных источников, радиоизлучение которых на длинных волнах особенно сильно подвергается такому рассеянию. Изменяется и сама наблюдаемая структура излучения гало, ста-

новясь более диффузной, "расплывчатой". Показана также необходимость учета вклада в общее излучение магнитосферы активной области нетепловых механизмов радиоизлучения.

Уточнен метод определения величины коронального магнитного поля по многоволновым наблюдениям на радиотелескопе РАТАН-600 радиоизлучения над пятнами, в частности, по второй гармонике гиро-частоты. Предложен способ определения высоты основания короны над одиночными пятнами по радиоастрономическим и магнитографическим измерениям.

Автор выносит на защиту:

1. Метод моделирования трехмерной структуры и расчета характеристик радиоизлучения различных компонентов магнитосферы активной области на Солнце. Результаты диагностики плазмы некоторых компонентов активных областей, полученные с помощью разработанного пакета программ.
2. Результаты обработки наблюдений на РАТАН-600 микроволнового излучения активных областей на Солнце, анализ которых позволил уточнить спектрально-поляризационные и пространственные характеристики излучения отдельных структурных элементов этих объектов. Наблюдательные подтверждения существования длительных нетепловых процессов в короне Солнца (даже в период глубокого минимума солнечной активности).
3. Результаты исследования эффекта инверсии знака круговой поляризации в источниках типа "гало" и модельные расчеты, показавшие, что такая инверсия происходит в самом источнике излучения, что позволило предложить термин "самоинверсия знака круговой поляризации" для этого явления. Вывод о необходимости учета процессов рассеяния радиоизлучения при его распространении через материю гало, приводящее к замыванию изображений как самого гало, так и нижерасположенных пятенных и пекуляр-

ных источников, а также к существенному изменению спектров потоков этих объектов.

4. Уточнение физического смысла определения величины магнитного поля над пятнами по наблюдениям на РАТАН-600. Первые надежные измерения магнитного поля по второй гармонике гирочастоты, выявившие заметное расхождение с измерениями по третьей гармонике для тех же источников. Метод определения высоты основания короны над пятнами с использованием радиоастрономических и магнитографических наблюдений одиночных пятен.
5. Результаты исследования и моделирования микроволновых всплесков, показавшие, что основное энергосодержание происходит в вершине корональной петли с последующим распространением энергии к основаниям петли со скоростью, характерной для ударных волн.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались на 26-ой радиоастрономической конференции (18-22 сент. 1995 г., С.-Петербург), 29-th Young European Radio Astronomers Conference (Riccione, Italy, 23-26 September, 1996), 27-ой радиоастрономической конференции Проблемы современной радиоастрономии (С.-Петербург, 10-14 ноября 1997 г), 2-nd Advances in Solar Physics Euroconference Three-Dimensional Structure of Solar Active Regions (October 7-11,1997, Preveza, Greece.), 30-th Young European Radio Astronomers Conference (September 14-19, 1997, Krakow, Poland), IAU23(Kyoto, August 17-30, 1997), 22-nd General Assembly of the European Geophysical Society (Vienna, 21-25 April 1997), школе-семинаре молодых радиоастрономов "Радиоастрономия в космосе" (Пушино, 14-16 апреля 1998г.),CESRA Workshop on Coronal Explosive Events (Espoo 1998, Finland, June 8-13, 1998), ASPE98 - Magnetic Fields and Oscillations (Potsdam/Caputh, Germany, 22-26 September 1998), конференции "Достижения и проблемы солнечной радиоастрономии" (6-9 октября 1998г., Санкт-Петербург), конференции "Крупномасштабная структура солнечной активности: достижения и перспективы" (С.-Петербург, 1999г), 9-th European Meeting

on Solar Physics "Magnetic Fields and Solar processes" (Firenze, Italy, September 12-18, 1999), школе-семинаре молодых радиоастрономов (Пушино, 10-11 апреля 2000), JENAM-2000 (Moscow, May 29 - June 23, 2000), 25-ый Международный Солнечный семинар (Patince, Словакия, 19-23 июня, 2000), а также на семинарах САО и ГАО.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка цитируемой литературы. Общий объем диссертации 156 страниц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, показаны место и роль данной работы в тематике научных исследований, дано развернутое описание целей выполненной работы, показаны ее новизна, научная и практическая значимость. Сформулированы положения, выносимые автором на защиту.

В первой главе описаны компоненты магнитосферы активных областей на Солнце, их наблюдательные характеристики и физическая интерпретация. Дан обзор литературы, к которому отражена история развития и современное состояние проблем моделирования радиоизлучения активных областей на Солнце.

Приведены формулы, использованные автором в данной работе для расчета характеристик радиоизлучения (интенсивности и оптической толщины радиоизлучения обыкновенной и необыкновенной мод) солнечных активных областей, на основе теплового тормозного, теплового гирорезонансного и нетеплового гиротронного механизмов, а также формулы для расчета распределения магнитного поля в дипольном приближении. Даны необходимые ссылки.

Представлен пакет программ на языке FORTRAN, написанных автором на основе разработанного метода моделирования трехмерной структуры компонентов магнитосферы активной области на Солнце и расчета характеристик радиоизлучения. Описано моделирование трехмерной структуры [3, 11] для различных компонентов (пятенных, пекулярных и флоккулярных источников, гало, источников микроволновых

всплесков) по задаваемому распределению температуры, электронной концентрации и магнитного поля, решение уравнения переноса излучения, построение двумерных карт распределения интенсивности и поляризации моделируемых источников радиоизлучения, а также распределений тех же характеристик излучения, сглаженных с одномерной диаграммой направленности радиотелескопов.

Во второй главе описываются наблюдения и моделирование долгоживущих компонентов магнитосферы активной области - таких как источник с флоккулом, пятенные источники, гало и пекулярный источник. Исследован эффект самоинверсии знака круговой поляризации гало. Представлены модельные расчеты и измерения магнитного поля над солнечными пятнами. Предложен метод определения высоты основания короны над пятнами.

В первом параграфе представлены наблюдения и моделирование не-теплового микроволнового излучения флоккулярного источника с волокном [5, 17]. Хорошо известно, что в микроволновом диапазоне имеются источники повышенного радиоизлучения, связанные с флоккулярными площадками на Солнце. Обычно считается, что эти повышения радиояркости обусловлены повышенной электронной плотностью в солнечной короне над флоккулами. В рамках теплового тормозного механизма генерации радиоизлучения яркостная температура оптически тонкого источника, связанного с флоккулом, должна возрастать пропорционально квадрату длины волны, что и наблюдалось в ряде случаев. В данной работе представлены расходящиеся с такой интерпретацией результаты наблюдений биполярной флоккулярной области с волокном, лежавшим на линии раздела полярностей магнитного поля. Наблюдения были выполнены в сентябре – октябре 1996 г. с высоким пространственным разрешением в широком диапазоне волн (1.7 – 20 см) на радиотелескопе РАТАН-600 (одномерные сканы с ножевой ДН, 16” на волне 1.7 см) Для интерпретации наблюдений были также использованы данные радиогелиографа в Nobeyama на волне 1.7 см.

На самых коротких волнах наблюдалось только волокно как область пониженной радиояркости. На более длинных волнах с обеих сторон волокна появляются два источника повышенной яркости, причем яркостная температура этих источников увеличивается пропорционально

кубу длины волны, что указывает на нетепловую природу происхождения этого радиоизлучения.

Радиоизлучение флоккула было промоделировано с учетом совместного действия теплового тормозного и нетеплового гиротронного излучения большой корональной петли, заполненной тепловой плазмой с некоторой добавкой нетепловых электронов. Присутствие волокна в зоне излучения моделировалось наличием в центре петли холодного плотного участка тепловой плазмы.

В распределении радиояркости по смоделированному источнику присутствуют два горба с минимумом посередине, что соответствует наблюдениям. Рассчитанный спектр полного потока излучения показывает хорошее совпадение с наблюдательными данными. Этот факт, а также значительная стабильность явления (более двух солнечных оборотов), свидетельствуют о непрерывно действующих нетепловых процессах в солнечной короне в период глубокого минимума солнечной активности.

Во втором параграфе описываются наблюдения и моделирование характерных компонент магнитосферы активной области - таких как пятенная компонента, гало и пекулярный источник на примере достаточно сложной по структуре активной области AR6471, в которую входили все перечисленные компоненты [13, 16].

Большая активная область AR6471 наблюдалась в период 24/01/1991 - 09/02/1991 на волнах в диапазоне 0.8 - 32 см на радиотелескопе РАТАН-600. Эта область являлась биполярной магнитной структурой с S-образной нейтральной магнитной линией.

Проведено компьютерное моделирование радиоизлучения компонентов данной активной области. Рассчитаны характеристики радиоизлучения (интенсивность, поляризация, яркостная температура и оптическая плотность), построены двумерные карты распределения яркостных температур обыкновенной и необыкновенной мод излучения, осуществлена свертка с диаграммой направленности РАТАН-600 для сравнения с наблюдениями.

Наблюдения двух пятенных источников согласуются с модельными расчетами для теплового циклотронного излучения на 2 и 3 гармониках гирочастоты в сильном магнитном поле (около 2600 Гс на уровне фотосферы). Зарегистрирован также компактный (20") и очень яркий (5МК

на 3.2 см) объект над нейтральной линией, вблизи вкрапления магнитного поля противоположной полярности. Такие характерные свойства позволили отнести его к группе так называемых «пекулярных» источников. Этот пекулярный источник был промоделирован как тепловое гирорезонансное излучение очень горячих (10 – 100 МК) низко расположенных корональных петель с умеренными (300 – 500 Гс) магнитными полями. В диапазоне 0.8 – 4.0 см наблюдалось широкое бесструктурное образование (гало), перекрывающее всю активную область, низкой яркости ($T_b = 50 - 250$ тыс. К), по сравнению с яркостью упомянутых выше компактных источников. Но в диапазоне волн 5 – 30 см излучение этого источника стало доминирующим, с максимумом потока $5 - 6 \times 10^5$ Ян на волнах 5 – 8 см. Источник гало был промоделирован как совместное излучение тепловых и нетепловых (субрелятивистских) электронов, заполняющих большие корональные магнитные петли (магнитосферу активной области).

Хорошее согласие полученных при моделировании расчетных спектров излучения и яркостной температуры с наблюдаемыми спектрами указывает на то, что такое исследование позволило достаточно верно определить физические параметры области излучения источников (магнитное поле, а также температуру и концентрацию электронов), оценить вклад тепловой и нетепловой составляющих гало, а также вклад отдельных источников активной области в общее радиоизлучение на разных длинах волн. Сделан вывод о необходимости учета процессов рассеяния радиоизлучения при его распространении через материю гало, приводящее к замыканию изображения на длинных (5 – 8 см) волнах расположенных ниже гало пятенных и пекулярного источников.

В третьем параграфе подтвержден наблюдениями и промоделирован эффект инверсии знака круговой поляризации в источниках типа "гало", при этом моделирование подтвердило предположение о том, что здесь имеет место эффект "самоинверсии", возникающий при распространении излучения источника через квазипоперечную область (QT-область) магнитного поля, которая в условиях большой корональной петли находится внутри самого источника излучения [21, 28].

Предлагается модель, объясняющая особенности спектра потоков и явление смены знака круговой поляризации, наблюдаемые в длинноволновом диапазоне ($\lambda > 5$ см) у источников микроволнового излуче-

ния, расположенных над активными областями на Солнце. Ранее по наблюдениям на БПР, РАТАН-600 и ССРТ было замечено, что интерпретация этих особенностей в рамках теории циклотронного излучения пятенной компоненты и его распространения через поперечное магнитное поле встречает определенные трудности. В отличие от этой теории развиваемая модель рассматривает излучение плазмы с учетом QT-распространения, удерживаемой в вершине АО и образующей протяженный источник (гало).

Результаты наблюдений интерпретируются и моделируются в рамках модели большой корональной петли (магнитосфере активной области) с достаточно сильным магнитным полем петли, содержащей тепловые электроны и надтепловые со степенным распределением по энергиям. При моделировании поляризованного излучения гало учитывались эффекты распространения через QT-область магнитного поля, которая в условиях большой корональной петли находится внутри самого источника излучения. Самоинверсия знака поляризации имеет место для той части корональной петли, которая расположена ближе к лимбу. Учет самоинверсии хорошо объясняет наблюдаемую асимметрию поляризационного изображения при прохождении АО вблизи лимба. Указывается, что расхождение наблюдаемых и расчетных спектров в длинноволновом участке спектра может быть устранено при учете эффекта рассеяния радиоизлучения при его распространении через материю гало.

В четвертом параграфе описаны модельные расчеты, проведенные для уточнения физического смысла определения магнитного поля в короне над солнечными пятнами по многоволновым наблюдениям в сантиметровом диапазоне [25, 30]. Предложен метод определения высоты переходного слоя над одиночными пятнами [23, 26, 29].

Резкий спад поляризованного спектра источников микроволнового излучения над пятнами в сторону коротких длин волн указывает, что температура над пятнами быстро увеличивается с высотой в узкой переходной зоне от хромосферы к короне. Этот наблюдательный факт позволил развить один из радиоастрономических методов измерения магнитного поля в основании короны по многоволновым поляризационным радионаблюдениям на РАТАН-600.

Для проверки и уточнения данного метода определения магнитных

полей над пятнами было проведено компьютерное моделирование. Модельные расчеты подтвердили, что при следовании методу измеряется максимальное значение магнитного поля пятен на высоте основания короны. Согласно моделированию, значение магнитного поля, измеряемое по наблюдениям на РАТАН-600 по излучению на 3-ей гармонике гирочастоты (необыкновенная волна или поляризованный поток), на 7% меньше действительной величины с точностью 3%, для измерений той же величины магнитного поля по 2-ой гармонике (обыкновенная волна) получаемая точность лучше 3%, без уменьшения (увеличения) действительной величины магнитного поля. Для примера были обработаны наблюдения 3 пятен: AR8716 (10.10.99), AR8668 (19.08.99) и AR8699 (13.09.99). Для этих пятен удалось померить магнитное поле по обоим гармоникам гирочастоты. Разница между величинами магнитного поля, измеренными по спектрам излучения на обыкновенной и необыкновенной волнах, составила около 20% (большее значение поля соответствовало измерениям по необыкновенной волне). Хотя ожидалось совпадение этих величин в пределах ошибок, эта разница заметно превышает точность измерения для каждого из значений магнитного поля, которая была найдена из моделирования.

Весьма малая высота (порядка 2000 км) основания короны осложняет ее определение наблюдательными методами, что обосновывает необходимость развития модельных методов. По магнитографическим наблюдениям с хорошим пространственным разрешением 3 – 5 " можно измерить распределение магнитного поля пятна на фотосфере. В некоторых работах было показано, что распределение напряженности фотосферного магнитного поля, полученное для ряда пятен, можно согласовать с дипольным. В то же время, дипольное приближение широко используется в моделировании радиоизлучения пятенных источников. Представляя магнитное поле над пятном в дипольном приближении, можно связать измеренные фотосферные и корональные значения поля и определить высоту основания короны над пятном. На основании этих соображений предложен метод для определения высоты основания короны через распределение магнитного поля над пятном в дипольном приближении с использованием одновременно данных магнитографических и радионаблюдений. Метод был проверен на шести одиночных симметричных пятнах. На примере этих пятен подтверждено, что для

представления магнитного поля симметричных пятен на уровне фотосферы можно использовать дипольное приближение. Для высоты основания короны получены значения от 600 до 4300 км над фотосферой пятна, со средним значением около 2000 км.

В третьей главе рассматривается короткоживущая всплесковая компонента магнитосферы активной области. Для понимания физики вспышки важное значение имеет исследование пространственной и временной структуры источника микроволнового всплеска, который, как правило, сопровождает вспышку. Такие исследования требуют высокого пространственного и временного разрешения, что достигается одновременно только в исключительных случаях. Отрывочность наблюдений всплесков на РАТАН-600 связана с плохим временным разрешением этого радиотелескопа, однако его высокое пространственное разрешение и широкий спектральный диапазон позволили в ряде случаев получить новые данные о пространственной структуре источников всплесков на большом числе частот микроволнового диапазона.

В первом параграфе представлены наблюдения и моделирование микроволнового излучения корональной магнитной петельной структуры источника так называемого «миллиметрового» всплеска [4, 15, 18]. Мощный миллиметровый всплеск с максимальным потоком 3000 с.е.п. на волне 2 см наблюдался 30 января 1991 года. Наблюдения на РАТАН-600 были проведены спустя 30 минут после главного максимума всплеска, на стадии "post burst increase" (*PBI*), в диапазоне длин волн 0.8 – 11.7 см. Очень яркий источник всплеска был зарегистрирован на коротких волнах: эффективная яркостная температура его излучения на волне 8 мм достигала 500 000 К, что на 2 – 3 порядка превышало предвсплесковый уровень. Уярчение источника сопровождалось значительным увеличением (примерно в полтора раза) его размеров во всем диапазоне волн при отсутствии каких-либо тонких деталей (при разрешении 7 – 10 угл. сек.) в яркостном распределении как интенсивности, так и круговой поляризации.

Была построена трехмерная модель корональной магнитной петельной структуры источника всплеска для стадий максимума и *PBI*. Для обеих стадий проведены компьютерные расчеты, учитывающие совместное действие трех механизмов излучения: теплового тормозного и гиро-

резонансного излучения и нетеплового гиросинхротронного излучения.

Посчитаны физические параметры области излучения (температура, электронная плотность, магнитное поле, мера эмиссии) на стадиях максимума всплеска и РВИ, с привлечением рентгеновских данных и данных радионаблюдений других обсерваторий. Сделан вывод о том, что некоторое противоречие между радио и рентгеновскими мерами эмиссий (на момент максимума всплеска мера эмиссии по радиоданным на два порядка превышает рентгеновскую меру эмиссии) может быть разрешено при учете нетепловых механизмов излучения.

В 1999 г. на РАТАН-600 начались исследования длительных микро-всплесков, которые существуют в течение нескольких дней и которые включают короткие импульсные всплески. Их наблюдения проводятся в дециметровом диапазоне 1000 – 1500 МГц. Представляет интерес получение данных наблюдений всплесков других обсерваторий в дециметровом диапазоне, но с временным профилем.

Во втором параграфе описываются наблюдения в диапазоне 1 – 2 ГГц трех всплесков с медленным позитивным дрейфом, наблюдавшихся в начале солнечных вспышек 2 мая 1998г., 23 сентября 1998 г. и 9 ноября 1999 г. на радиоспектрографе в Ondřejov (Чехия) [22, 24]. Посчитаны частотные дрейфы (20 – 125 МГц/сек), на основе модели распределения плотности оценены скорости источников возмущений и их высоты в предположении о плазменном механизме излучения на первой и второй гармониках. Эти скорости оказались слишком малы (120 – 1350 км/сек), чтобы быть связанными с потоками быстрых частиц. В роли возможных источников излучения всплесков предложены распространяющиеся в направлении фотосферы вдоль магнитных силовых линий петли ударные волны тепловой природы. Для одного из всплесков (23 сентября 1998 г.) более подробно рассмотрена модель поднимающейся вспышечной петли с распространением источников всплеска от вершины петли вниз к основанию петли вдоль силовых линий.

В заключении диссертации сформулированы основные результаты работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Разработан метод, позволяющий моделировать трехмерную структуру и рассчитывать радиоизлучение различных компонент магнитосферы активной области. Компьютерное моделирование наблюдаемых источников радиоизлучения позволило с помощью разработанного пакета программ уточнить физические параметры области излучения (температуру и электронную концентрацию, магнитное поле), оценить вклад тепловой и нетепловой составляющих, что продемонстрировано на примерах наблюдений нескольких активных областей.
2. Обработаны наблюдения микроволнового излучения некоторых активных областей на Солнце. Анализ наблюдений позволил уточнить спектрально-поляризационные и пространственные характеристики излучения отдельных структурных элементов активных областей (гало, пятенных, пекулярного и флоккулярного источников, источников микроволновых всплесков). Подтверждено наблюдениями существование длительных нетепловых процессов в солнечной короне в источниках типа "гало" (даже в период глубокого минимума солнечной активности).
3. Исследован эффект инверсии знака круговой поляризации в источниках типа "гало" и проведены модельные расчеты, показавшие, что такая инверсия происходит в самом источнике излучения, что позволило предложить термин "самоинверсия знака круговой поляризации" для этого явления. Сделан вывод о необходимости учета процессов рассеяния радиоизлучения при его распространении через материю гало, приводящих к замыванию изображений как самого гало, так и нижерасположенных пятенных и пекулярных источников, а также к существенному изменению спектров потоков радиоизлучения этих объектов.

4. Уточнен физический смысл определения величины коронального магнитного поля по многоволновым наблюдениям на РАТАН-600 радиоизлучения над пятнами. Такое уточнение позволило, в частности, впервые надежно измерить магнитное поле по второй гармонике гирочастоты над некоторыми пятнами и выявить заметное расхождение с измерениями по третьей гармонике для тех же источников. Определена высота основания короны над несколькими пятнами по предложенному автором методу с использованием радиоастрономических и магнитографических наблюдений одиночных пятен.
5. Исследована и промоделирована пространственная структура микроволнового всплеска на стадии послевсплескового уярчения (*PBI*) по наблюдениям на РАТАН-600. Исследована и интерпретирована временная структура всплесков с медленным положительным дрейфом по наблюдениям на радиоспектрографе в Ondřejov в диапазоне 1-2 ГГц. Результаты исследования микроволновых всплесков показали, что основное энерговыделение происходит в вершине корональной петли с последующим распространением энергии к основаниям петли со скоростью, характерной для ударных волн.

Личный вклад автора Автором разработан метод моделирования трехмерной структуры и расчета радиоизлучения различных компонент магнитосферы активной области и написаны все программы, использовавшиеся для модельных расчетов, кроме стандартных подпрограмм и подпрограмм, связанных с гаусс-обработкой. Автору принадлежит подбор моделей компонентов магнитосферы активной области и непосредственное участие в их разработке. Проведение всех компьютерных расчетов принадлежит автору. Автор принимал участие в обсуждении и интерпретации результатов моделирования. В работах, связанных с наблюдательным материалом, автор обрабатывал наблюдения AR6471 (область с пятнами, гало и пекулярным источником) и микроволнового всплеска 30.01.1991, а также всех пятенных источников, рассчитывал скорости дрейфов и другие параметры всплесков во

втором параграфе третьей главы. Автор проводил магнитографические наблюдения, результаты которых использованы в четвертом параграфе второй главы. Метод определения высоты основания короны над солнечными пятнами предложен автором.

Публикации по теме диссертации:

1. Шпитальная А.А., Петерова Н.Г., Кальтман Т.И., Вспышечная активность Солнца в день затмения 11 июля 1991 г. по наблюдениям на БПР, Пространственно-временные аспекты солнечной активности (сб. научных трудов), С.-Петербург, 1992, с.181-188.
2. Т.И.Кальтман, А.Н.Коржавин, Н.Г.Петерова, Структура мощного миллиметрового источника на стадии "Post Burst Increase" по наблюдениям на РАТАН-600, тезисы докладов XXVI радиоастрономической конференции, С.-Петербург, 18-22 сентября, 1995, с.174.
3. T.I.Kaltman, The model calculations of the thermal and non-thermal radio emission from solar active regions, Abstracts, XXIX YERAC, Riccione, Italy, 23-26 September, 1996, p.3.
4. Т.И.Кальтман, А.Н.Коржавин, Н.Г.Петерова, Структура мощного миллиметрового всплеска на стадии "Post Burst Increase" по наблюдениям на РАТАН-600, Известия Академии Наук, Серия физическая, 1996, т.60, No 8, с.160-170.
5. Кальтман Т.И., Коржавин А.Н., Степанов А.А., Гельфрейх Г.Б., Шибасаки К., Нетепловое микроволновое излучение флоккулов и его трехмерное моделирование по наблюдениям на РАТАН-600 в сентябре-октябре 1996 г., XXVII радиоастрономическая конференция "Проблемы современной радиоастрономии", С.-Петербург, 10-14 ноября, 1997, Том 2, с.16-17.
6. Kaltman T.I., Korzhavin A.N., Peterova N.G., Lubyshev B.I., Maksimov V.P., Alissandrakis C., Fu Q., Sunspot-associated Sources, a Peculiar Source and a Halo-like Source as Basic Componentes of the 3D Structure of a Large Active Region from RATAN-600 and SSRT Observations, Final Program and Abstracts, 2-nd Advances in Solar

- Physics Euroconference Three-Dimensional Structure of Solar Active Regions, Preveza, Greece, October 7-11, 1997, p.14-15.
7. Korzhavin A.N., Kaltman T.I., Stepanov A.A., Gelfreikh G.B., Shibasaki T., Non-thermal Microwave Solar Radio Emission from Plage-associated Coronal Loops and their 3D Modelling, Final Program and Abstracts, 2-nd Advances in Solar Physics Euroconference Three-Dimensional Structure of Solar Active Regions, Preveza, Greece, October 7-11, 1997, p.42-43.
 8. Kaltman T.I., 3-dimensional modelling of solar microwave radio sources of slowly varying component, Abstracts, 30-th Young European Radio Astronomers Conference, Krakow, Poland, September 14-19, 1997, p.22.
 9. Korzhavin A.N., Kaltman T.I., Stepanov A.A., Gelfreikh G.B., Shibasaki T., Non-Thermal Microwave Solar Radio Emission from Plage-associated Coronal Loops and their Modelling, Abstracts, Kyoto IAU23, August 17-30, 1997, p.253.
 10. Korzhavin A.N., Kaltman T.I., Stepanov A.A., Non-Thermal Microwave Solar Emission from Plage-associated Sources and their Modelling, 22nd General Assembly of EGS in Vienna, Annales Geophysicae, Supplement of Volume 15, 1997, p.21-25.
 11. T.Kaltman, 3-dimensional modelling of solar microwave radio sources of slowly varying component, 30-th Young European Radio Astronomers Conference, Acta Cosmologica, Uniwersytetu Jagiellonskiego, Krakow, 1997, p.131-134.
 12. Кальтман Т.И., Коржавин А.Н., Петерова Н.Г., Основные компоненты структуры радиоизлучения активной области в компьютерном 3D-моделировании по наблюдениям Солнца на РАТАН-600, Программа и тезисы докладов, Школа-семинар молодых радиоастрономов "Радиоастрономия в космосе", Пушкино, 14-16 апреля, 1998, с.21-22.
 13. T.Kaltman, A.Korzhavin, N.Peterova, The basic components of radio emission of solar active region in 3D-modelling, CESRA Workshop on

Coronal Explosive Events, Metsahovi Publications on Radio Science, Espoo, Finland, June 8-13, 1998, p.43.

14. T.I.Kaltman, A.N.Korzhavin, Coronal magnetic loop structure of a large mm burst as inferred from modeling of their microwave emission, Abstracts, ASPE98 - Magnetic Fields and Oscillations, Potsdam/Caputh, Germany, 22-26 September, 1998, p.87-88.
15. Кальтман Т.И., Коржавин А.Н., Модель микроволнового всплеска на Солнце, Труды научной конференции "Достижения и проблемы солнечной радиоастрономии", С.-Петербург, 6-9 октября, 1998, с.81-84.
16. Kaltman T.I., Korzhavin A.N., Peterova N.G., Lubyshv B.I., Maksimov V.P., Alissandrakis C., Fu Q., Sunspot-associated Sources, a Peculiar Source and a Halo-like Source as Basic Components of the 3D Structure of a Large Active Region from RATAN-600 and SSRT Observations, Astronomical Society of the Pacific Conference Series, Second Advances in Solar Active regions, ed. C.Alissandrakis and B.Schmieder, 1998, v.155, p.140-144.
17. Korzhavin A.N., Kaltman T.I., Stepanov A.A., Gelfreikh G.B., Shibasaki T., Non-thermal Microwave Solar Radio Emission from Plage-associated Coronal Loops and their 3D Modelling, JOSO Annual Report 1997, Eds. A.Antalova and A.Kucera, p.92-93.
18. T.I.Kaltman, A.N.Korzhavin, Coronal magnetic loop structure of a large mm burst as inferred from modeling of their microwave emission, JOSO Annual Report 1998, Eds. A.Antalova, Balthasar and A.Kucera, p.92-93.
19. Т.И.Кальтман, А.Н.Коржавин, Моделирование радиоизлучения мощного миллиметрового всплеска на Солнце, тезисы докладов научной сессии молодых ученых "Гео- и гелиофизические исследования", Иркутск, 15-16 октября, 1998, с.6-7.
20. T.I.Kaltman, A.N.Korzhavin, The model calculations and the measurements of magnetic field above sunspots, Программа и тези-

- сы докладов конференции "Крупномасштабная структура солнечной активности: достижения и перспективы", С.-Петербург, 1999, с.33-34.
21. Т.И.Кальтман, А.Н.Коржавин, Н.Г.Петерова, Самоинверсия знака круговой поляризации и рассеяние радиоизлучения в источниках типа "гало" микроволнового излучения активных областей, Программа и тезисы докладов конференции "Крупномасштабная структура солнечной активности: достижения и перспективы", С.-Петербург, 1999, с.34-35.
 22. P.Kotrč, M.Karlický, Yu.A.Kupryakov, T.I.Kaltman, J.Kašparová, B.Rompolt, Physical characteristics of the September 23, 1998 solar flare, 9th European Meeting on Solar Physics "Magnetic Fields and Solar processes", Firenze, Italy, September 12-18, 1999, p.841-846.
 23. Т.И.Кальтман, А.Н.Коржавин, М.Клваňa, К определению высоты переходного слоя над солнечными пятнами, Программа и тезисы докладов, Школа-семинар молодых радиоастрономов "Радиоастрономия на пороге XXI века - успехи и перспективы", Пушкино, 10-11 апреля, 2000, с.18-19.
 24. Kaltman T., Karlický M., Jiříčka K., The 1-2 GHz slowly positively drifting bursts at the beginning of the May 2, 1998, September 23, 1998, and November 9, 1999 solar flares, JENAM-2000, European Astronomy at the Turn of the Millenium, Moscow, May 29-June 3, 2000, p.123.
 25. T.I.Kaltman, A.N.Korzavin a M.Klvaňa, Radioastronomická merení magnetických poli ve skvrnach, XV Международный Солнечный семинар, Patince, Словакия, 19-23 июня, 2000, <http://www.suh.sk/obs/slnsem/zbornik.htm>
 26. T.I.Kaltman, M.Klvaňa a V.Bumba, Modelování prostorové konfigurace magnetického pole symetrické skvrny na základě optických, a radiových pozorování, XV Международный Солнечный семинар, Patince, Словакия, 19-23 июня, 2000, <http://www.suh.sk/obs/slnsem/zbornik.htm>

27. M.Klvaňa, V.Bumba a T.I.Kaltman, Specifikace normalnich a anomálnich efektu v magnetických a rychlostních polích symetrických skvrn, XV Международный Солнечный семинар, Patince, Словакия, 19-23 июня, 2000, <http://www.suh.sk/obs/slusem/zbornik.htm>
28. Т.И.Кальтман, А.Н.Коржавин, Н.Г.Петерова, Самоинверсия круговой поляризации и рассеяние радиоизлучения в микроволновых источниках типа "гало" активных областей на Солнце, тезисы докладов конференции "Солнце в максимуме активности и солнечно-звездные аналогии", С.-Петербург, 17-22 сентября, 2000, с.124-126.
29. Кальтман Т.И., Коржавин А.Н., М. Klvaňa, К определению высоты основания короны над солнечными пятнами, тезисы докладов конференции "Солнце в максимуме активности и солнечно-звездные аналогии", С.-Петербург, 17-22 сентября, 2000, с.127-129.
30. A.N.Korzhavin, T.I.Kaltman, V.M.Bogod, V.I.Garaimov, Model treatment of the magnetic field measurements in the solar corona above sunspots, тезисы докладов конференции "Солнце в максимуме активности и солнечно-звездные аналогии", С.-Петербург, 17-22 сентября, 2000, с.153-155.