

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ГЛАВНАЯ АСТРОНОМИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ

На правах рукописи

УДК 523.98

Григорьева Ирина Юрьевна

**Исследование эруптивных событий на Солнце
по наблюдениям на РАТАН-600**

Специальность 01.03.02 — астрофизика и звездная астрономия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург 2010 г.



Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Главной (Пулковской) Астрономической обсерватории РАН.

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук
В.Н. Боровик.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук
Л.В. Яснов,

кандидат физико-математических наук
И.В. Кудрявцев.

Ведущая организация:

Институт земного магнетизма и распространения радиоволн РАН им. Пушкова, Московская обл., Троицк.

Защита диссертации состоится **14 мая 2010 г.** в **11 часов 30 минут** на заседании диссертационного совета Д 002.120.01 Главной астрономической обсерватории РАН по адресу: 196140, Санкт-Петербург, Пулковское шоссе, 65/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Главной (Пулковской) астрономической обсерватории РАН (Санкт-Петербург, Пулковское шоссе, д. 65).

Автореферат разослан ... апреля 2010 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 002.120.01,
кандидат физико-математических наук

Е.В. Милецкий



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Работа посвящена изучению эруптивных событий на Солнце – наиболее энергичных проявлений солнечной активности. Они включают в себя комплекс динамичных явлений: вспышки и формирование постэруптивных аркад, эрупции протуберанцев и корональные выбросы массы (СМЕ – Coronal Mass Ejection), корональные и хромосферные волны. В конкретных событиях некоторые из этих явлений могут быть выражены в большей или меньшей степени. Их взаимосвязь и механизмы запуска до конца не изучены, так же как и неясны их количественные закономерности и параметры плазмы. Главенствующий в настоящее время подход к исследованиям солнечных эруптивных событий основан на анализе СМЕ и связанной с ним вспышки как двух частей одного и того же нестационарного процесса.

Если постоянно существующие высокоскоростные потоки солнечного ветра из корональных дыр формируют коротящие возмущения межпланетного магнитного поля, то внезапные СМЕ возмущают межпланетную среду в определенном телесном угле. Потоки электронов и ионов, ускоренных в эруптивных событиях до высоких энергий, могут внедряться в земную атмосферу. Возмущения в околоземном пространстве, магнитосфере и ионосфере Земли, возникающие под воздействием порождаемых эруптивными событиями на Солнце ионизирующих излучений, мощных радиовсплесков, прихода магнитных облаков, негативно воздействуют на высокотехнологичные системы и являются факторами риска для пилотируемых космических полётов и даже для дальней авиации. Эти важнейшие для современного человечества аспекты состояния окружающей среды, определяемые совокупностью перечисленных факторов, в последние годы называют «Космической погодой». Потенциальная геоэффективность солнечных эруптивных событий до настоящего времени также во многом неясна, как и физика происходящих в них процессов, что настоятельно требует их тщательного исследования. Этим определяется актуальность и практическая значимость данной работы.

Поскольку Солнце является ближайшей к Земле звездой, гелиофизические результаты удобно использовать для проверки астрофизических теорий и результатов лабораторных экспериментов. Процессы типа солнечной активности изучаются на звездах поздних спектральных классов. Наблюдения последних лет показали, что солнечные и звездные вспышки можно представить в одном ряду нестационарных процессов, различающихся по энергии. Изучение этих процессов в условиях различной силы тяжести и масштабов магнитных полей позволяет судить об общности тех или иных астрофизиче-

ских явлений.

Ранее вспышки на Солнце наблюдались в линии H_α как быстрые увеличения яркости небольшого участка в хромосфере над активной областью. Эта яркая область быстро превращалась в две святящиеся ленты, которые на заключительной стадии вспышки соединялись системой петель, заполненных холодной плазмой ($T \sim 10^4\text{K}$). Такие послевспышечные петли лучше всего наблюдаются на фоне неба, когда вспышка происходит вблизи лимба. С началом наблюдений в мягком рентгеновском диапазоне было установлено, что основной процесс при вспышке – это формирование системы корональных петель, заполненных горячей плазмой с температурой от нескольких до десятков МК. Солнечные вспышки характеризуются мощным энерговыделением. В ряде случаев постэруптивные аркады существуют от нескольких часов до суток и поднимаются на высоты порядка сотни тысяч км. Благодаря развитию космического приборостроения стали возможными недоступные на поверхности Земли наблюдения нижней короны в крайнем ультрафиолете (EUV). Данные наблюдений на телескопах этого диапазона, функционирующих на космических обсерваториях SOHO, TRACE, КОРОНАС-Ф, RHESSI, Hinode, предоставляют обширную информацию для исследований солнечных эрупций, вспышек и различных постэруптивных проявлений.

Наземные радиоастрономические наблюдения Солнца в диапазоне от миллиметровых до дециметровых длин волн дают информацию о строении солнечной атмосферы и развитии в ней физических процессов в широком диапазоне высот – от нижних слоев хромосферы до удаленных слоев короны, где формируется солнечный ветер. Исключительно важны наблюдения Солнца в микроволновом диапазоне на больших инструментах с высоким пространственным разрешением с анализом спектра и поляризации. Они дают информацию о механизмах радиоизлучения, параметрах тепловой плазмы и нетепловых электронов, величине магнитного поля в тех слоях солнечной атмосферы, где развиваются основные явления перед эруптивными событиями – перенос и накопление энергии, диссипация и трансформация нетепловых видов энергии в тепловую перед быстрым энерговыделением. Регулярные солнечные наблюдения позволяют обнаружить изменения физических условий и структуры плазмы в активных областях за несколько дней до эруптивных геоэффективных событий, что является основой для разработки физически обоснованных методов их прогноза. В совокупности с наблюдениями в других энергетических диапазонах, микроволновые радионаблюдения Солнца позволяют исследовать структуру и физические условия в постэруптивных долгоживущих высокотемпературных корональных петлях, что необходимо для

выяснения факторов, влияющих на межпланетную среду и определяющих потенциальную геоэффективность различных проявлений солнечной активности.

Эффективность радиоастрономических исследований Солнца определяется техническими характеристиками используемых инструментов. Сейчас в мире не существует радиотелескопа, который одновременно по пространственному, временному и спектральному разрешению, по диапазону, чувствительности и точности поляризационных измерений удовлетворял бы всем требованиям, необходимым для решения перечисленных выше задач. Поэтому важно сопоставление результатов наблюдений, получаемых на отдельных крупнейших радиоастрономических инструментах мира, работающих в микроволновом диапазоне – VLA, OVRO (США), радиогелиографе Nobeyama (Япония), ССРТ, РАТАН-600 и БПР (Россия), РТ-22 (Украина).

Среди перечисленных инструментов РАТАН-600 выделяется уникальными характеристиками, необходимыми для солнечных исследований: широкодиапазонностью (мм-дм), большой площадью собирающей поверхности, точностью поляризационных измерений, достаточно высоким пространственным разрешением (несколько секунд дуги на коротких сантиметровых волнах), высоким заполнением UV-плоскости антенны, позволяющим регистрировать радиоизлучение как компактных, так и протяженных объектов (всего солнечного диска), возможностью проводить регулярные (ежедневные) наблюдения Солнца не в ущерб другим астрофизическим программам. Эти характеристики антенны в сочетании с обеспечиваемым приемной системой одновременным получением данных во всем диапазоне спектра при высоком динамическом диапазоне позволяют исследовать многообразные солнечные явления, в том числе эруптивные.

Однако при наблюдении Солнца на РАТАН-600 с ножевой диаграммой направленности часто возникают трудности при отождествлении источников радиоизлучения, а также при исследовании быстропеременных источников из-за отсутствия режима слежения.

Разработано несколько методов получения двумерных изображений на РАТАН-600 одновременно на ряде волн и вариантов слежения за источником излучения, но регулярное применение таких режимов в солнечных наблюдениях сложно осуществить организационно на таком многопрограммном инструменте как РАТАН-600. На антенной системе радиотелескопа «Южный сектор + Перископ», которая регулярно используется для наблюдений Солнца, реализован способ многоволнового картографирования в многоазимутальных наблюдениях за счет изменения азимутального угла наблюдений

в течение дня. Практически такой метод позволяет получать сканы Солнца с интервалом в 4 мин в течение 4 часов [1], однако до настоящего времени этот режим наблюдений применялся лишь эпизодически.

Цель работы – выявление характерных особенностей эволюции и динамики корональных петель, формируемых при солнечных эруптивных событиях различной мощности, и их физических характеристик по спектрально-поляризационным наблюдениям в микроволновом диапазоне на РАТАН-600 с привлечением данных других энергетических диапазонов. Цель достигается на основе решения следующих задач:

1. выявление особенностей микроволнового излучения активных областей, проявляющихся за несколько дней до мощных вспышек, которые могут быть геоэффективными;
2. анализ результатов микроволновых наблюдений центра активности – источника серии мощных непродолжительных гомологических вспышек;
3. исследование параметров плазмы и физических процессов в постэруптивных аркадах на разных стадиях эруптивных вспышек с длительной фазой затухания (LDE).

Структура и объем диссертационной работы

Работа состоит из Введения, четырех глав и Заключения. Объем диссертации 120 страниц, в том числе 40 рисунков и 70 библиографических ссылок.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность работы, сформулирована цель исследования, конкретные задачи для ее достижения и методы их решения. Показана роль радиоастрономических наблюдений в исследовании нестационарных (эруптивных) процессов на Солнце.

Приведем краткое изложение содержания диссертации по главам.

В **Главе 1 «Радиотелескоп РАТАН-600 как инструмент для солнечных исследований»** в разделе 1.1 приводятся основные параметры антенной системы радиотелескопа РАТАН-600, состоящей из Южного сектора антенны и плоского перископического зеркала (Ю+П), на которой регулярно проводятся наблюдения Солнца. Размер диаграммы направленности антенной системы Ю+П по уровню $1/2$ мощности составляет $17'' \times 13'$ на волне 2.0 см. Приведены параметры приемно-регистрирующей аппаратуры, которую постоянно совершенствовали на протяжении более 30 лет и продолжают развивать сотрудники Группы солнечных исследований (САО) под руководством В.М. Богода [2].

Регулярные многоволновые наблюдения Солнца на РАТАН-600 начали проводиться с ноября 1974г. В большинстве случаев это были транзитные наблюдения в меридиане, но в отдельные периоды велись дополнительные наблюдения в 3-7 азимутах. В данной работе для исследования нестационарных (эруптивных) явлений на Солнце из огромного архива наблюдательных данных были выбраны именно те события, которые наблюдались не только в меридиане, но и в азимутах. В настоящее время, кроме ежедневных транзитных наблюдений Солнца в меридиане, эпизодически используется режим многоазимутальных наблюдений.

В **разделе 1.2** описывается методика наблюдений на РАТАН-600 тех солнечных эруптивных событий, исследование которых составило содержание данной работы. Для выбора наблюдательного материала использовали как архив наблюдательных данных РАТАН-600 за три одиннадцатилетних цикла солнечной активности, так и текущие наблюдения. Выбор анализируемых эруптивных событий основывался на их значимости с точки зрения получения астрофизической информации, способствующей достижению цели работы – исследование эволюции и динамики вспышечных корональных петель. При этом учитывалась полнота и качество наблюдательного материала, полученного как на РАТАН-600, так и на других радиоастрономических инструментах, а также с космических аппаратов и в наземных обсерваториях в различных диапазонах солнечного излучения.

В **разделе 1.3** описаны методы обработки наблюдательного материала. Основное внимание уделено точности определения наблюдательных характеристик исследуемых источников радиоизлучения (положение на диске Солнца и за его пределами, поток излучения, угловой размер, процент круговой поляризации). Описана методика выделения источника над уровнем излучения спокойного Солнца в центральной части солнечного диска и около лимба, учет и исключение паразитных сигналов в канале поляризации. Изложены методы абсолютной калибровки потока радиоисточников с учетом результатов наблюдений невозмущенного Солнца в период минимума солнечной активности и наблюдений опорных источников. Полученные на РАТАН-600 данные сопоставлялись с данными других крупных радиотелескопов микроволнового диапазона (БПР, ССРТ и NoRH), а также с интегральными потоками Солнца, измеренными на станциях Службы Солнца (Toyokawa/Nobeyama, Ottawa/Penticton, Learmonth и др.). Для учета влияния различных ошибок, возникающих при реализации многоазимутального режима наблюдений на Ю+П, использовались результаты наблюдения стабильных радиоисточников в разных азимутах. Обработка данных выполнялась с помощью пакета про-

грамм, разработанных В.И. Гараимовым [3].

В Главе 2 «Особенности микроволнового излучения активных областей на Солнце перед мощными геоэффективными эруптивными событиями» в разделе 2.1 дан обзор результатов, касающихся этой проблемы, полученных на РАТАН-600 и других радиотелескопах.

В начале 80-х годов на основе регулярных многоволновых наблюдений на РАТАН-600 ряда активных областей на Солнце, отличающихся высокой вспышечной активностью, были выделены компактные «пекулярные» источники радиоизлучения (ПИ) накануне эруптивных событий. В коротковолновой части сантиметрового диапазона их излучение доминировало над остальными деталями активных областей. «Пекулярность» этих источников заключается в том, что их трудно интерпретировать как обычные компоненты активных областей (пятенные источники, флоккулярное излучение, излучение корональной конденсации, гало). По своему положению ПИ проектируются на линию раздела полярностей фотосферного магнитного поля в районе наиболее тесного сближения теней пятен с противоположными знаками магнитного поля, находящихся в одной общей полутени. Характерные размеры ПИ 10-30 сек дуги. Они отличаются большими значениями яркостных температур (до 10 МК) на волне 4 см, высоким спектральным индексом на коротких см-волнах, умеренной степенью поляризации. Максимум спектра потоков этих источников достигается на волне около 3 см. (например, [4, 5]). Высокая яркостная температура ПИ свидетельствует о том, что ПИ диагностируют в короне на высотах порядка 10 тыс. км области высокого энерговыделения, устойчивые в течение нескольких дней, которые можно связать с процессом пересоединения магнитных силовых линий в токовом слое, приводящем к нагреву плазмы и ускорению частиц [6, 7].

По данным радиогелиографа Nobeyama (NoRH) на волне 1.76 см при анализе двумерных изображений ряда активных областей, производящих мощные вспышки и корональные выбросы массы (СМЕ), были выявлены компактные и яркие радиоисточники над нейтральной линией фотосферного магнитного поля (NLS – Neutral Line Sources). Как показано в работе [8], появление в активной области одного или нескольких NLS является фактором прогноза (за 1-3 дня) мощных вспышек класса X большой продолжительности. При этом вершина петли NLS расположена в основании токового слоя, что обеспечивает постоянное поступление в петлю NLS тепла, плазмы и, вероятно, нетепловых частиц [9]. Естественно предположить, что пекулярные источники и NLS имеют общую природу, однако это утверждение требует дополнительного рассмотрения.

Многолетние наблюдения Солнца на РАТАН-600 привели к обнаружению ряда других свойств в излучении вспышечно-продуктивных областей. Это – эффект «потемнения» в активной области перед мощной вспышкой, природа которого связывается с появлением плотного волокна; явление уярчения или понижения поляризованного излучения в некоторой части диапазона 2-5 см; двойная инверсия знака поляризации в узком диапазоне частот, которая объясняется образованием «провалов» (dips) в магнитном поле [10, 11].

В ряде недавно выполненных работ проведено исследование предвспышечных состояний активных областей, связанных с эруптивными событиями. На основе комплексного анализа данных больших солнечных радиотелескопов – РАТАН-600, БПР, ССРТ, РТ-22 (КрАО), NoRH (например, [12]) было зарегистрировано всплывание нового магнитного потока в пределах старой группы пятен накануне активных событий, сделан вывод о том, что нетепловые процессы протекают в квазиспокойном состоянии активной области в течение нескольких дней, предшествующих выбросу.

По результатам наблюдений Солнца на БПР в период высокой вспышечной активности в октябре 2003г была подтверждена правомерность применения критерия «Танака-Эноме» для прогноза мощных вспышек и уточнен его физический смысл [13].

В разделе 2.2 исследована эволюция микроволнового излучения активной области (АО) 10930, связанной с геоэффективной вспышкой X3.4/4B (с энергиями протонов более 100 МэВ) 13 декабря 2006г (минимум 23-го цикла солнечной активности). В этот период на Солнце наблюдалось развитие комплекса активности, основным элементом которого на протяжении четырех оборотов являлась изолированная компактная АО с крупным пятном. В декабре 2006г в этой области произошла серия вспышек, две из которых были высоких рентгеновских классов – X9 (5.12.06) и X3.4 (13.12.06). Наиболее благоприятные условия для наблюдений этой области на РАТАН-600 в ее предвспышечный период представились перед вспышкой 13.12.06, которая произошла на диске через два дня после пересечения АО центрального меридиана. По данным спутников SOHO/MDI и Hinode за три дня до вспышки в области начались заметные сдвиговые движения, а за день до вспышки отмечалось вращения основного пятна и окружающих его элементов против часовой стрелки – завихренность [14]. В компактной группе происходило развитие нового магнитного потока в пределах полутени основного пятна с ядром противоположной полярности. Ежедневные мноволновые наблюдения Солнца на РАТАН-600 в диапазоне 1.8-5.0 см выявили следующие особенности микроволновых характеристик АО: в период, предшествующий мощной

геоэффективной вспышке, спектры интегрального потока АО, растущие с длиной волны, имели явно выраженный локальный максимум в районе 3 см, который не наблюдался после вспышки, когда спектр соответствовал тепловому магнитотормозному излучению радиоисточника, связанного с основным пятном группы. Вид спектров в период, предшествующий вспышке, интерпретируется как результат наложения спектра «пекулярного» радиоисточника, появившегося в результате изменения магнитной конфигурации АО, на спектр источника, связанного с головным пятном.

К аналогичному выводу пришли авторы работы [15], проследившие эволюцию микроволновых характеристик этого активного комплекса на протяжении четырех оборотов Солнца (с ноября 2006г по февраль 2007г) по наблюдениям на БПР с умеренным пространственным разрешением на четырех длинах волн в диапазоне 2.7-20 см.

В разделе 2.3 исследована эволюция группы NOAA 7321, в которой 2 ноября 1992г за лимбом произошла мощная вспышка X9. Эта область, образовавшаяся на диске 24 октября, быстро развивалась и в период максимальной фазы своего развития представляла компактное образование со сложной магнитной конфигурацией. О развитии «пекулярного» источника в активной области в период, предшествующий вспышке X9, свидетельствуют спектры интегрального потока АО с максимумом на волнах 3-3.5 см. Вывод подтвержден и анализом интегральных потоков радиоизлучения Солнца по данным патрульных наблюдений в рамках Службы Солнца. По данным Yohkoh/SXT и NoRH (1.76 см) накануне вспышки X9 в этой области был зарегистрирован источник над нейтральной линией фотосферного магнитного поля (NLS), отождествленный с областью магнитного пересоединения [9], который, возможно, по своей природе тождественен «пекулярному» источнику.

Анализ спектрально-поляризационных характеристик микроволнового излучения двух рассмотренных изолированных вспышечно-активных областей и результаты, полученные ранее (в 80-х годах) группой ГАО на РАТАН-600 и из наблюдений солнечных затмений, позволяют сделать вывод, что выявление «пекулярного» источника в микроволновом излучении активной области является одним из типичных индикаторов последующего повышения вспышечной активности группы пятен.

В Главе 3 «Микроволновые наблюдения области NOAA 9236 – источника серии гомологических быстрых мощных вспышек» приведены результаты наблюдений на РАТАН-600 вспышечно-активной области 9236 и произошедшей в ней вспышки (M3.5/2N) 25 ноября 2000г.

На основе статистического анализа однородных данных о мягком рентге-

новском излучении Солнца выделено три типа вспышек: быстрые события, длящиеся не более 30 мин; типичные двухленточные вспышки с длительностью до 1-2 часов и редкие, очень длительные события (LDE – Long Duration Event). Последние включают в себя вспышки со сложной пространственно-временной структурой. В них один или несколько эпизодов импульсного энерговыделения сопровождаются формированием постэруптивных петель. Наиболее слабые из LDE обычно связаны с выбросом волокон. Подъем арочной системы, как правило, останавливается на высотах от 30 до 100 тыс. км, но в редких случаях магнитные петли в так называемых динамических вспышках уходят в межпланетное пространство.

Исследование микроволнового излучения области NOAA 9236 по данным РАТАН-600 проводилось в рамках международной программы «МЕОС» (Moreton/EIT Observing Campaign), проходившей с 6 ноября по 8 декабря 2000г, целью которой было изучение предвспышечного и послевспышечного состояний активных областей [16].

В **разделе 3.1** представлена эволюция группы пятен и ее микроволнового излучения в процессе прохождения группы по диску Солнца с 17 по 30 ноября 2000г. Первоначально группа состояла из большого головного пятна северной полярности и мелких пятен в хвостовой части южной полярности. По данным микроволновых наблюдений на NoRH (1.76 см), ССРТ (5.2 см) и РАТАН-600 (1.7-30 см), в этот период характеристики поляризованного микроволнового излучения этой активной области соответствовали типичным средним характеристикам биполярных активных областей.

23 ноября вокруг головного пятна начали появляться мелкие пятна различной полярности, происходило активное всплытие нового магнитного потока, однако площадь группы существенно не изменялась. В период с 24 по 26 ноября группа характеризовалась высокой вспышечной активностью. В ней за указанные три дня произошло 5 вспышек X и 3 вспышки M (GOES класс). Вспышки происходили примерно с интервалом в 10 часов и были короткими. Продолжительность их максимальной фазы была не более 34 мин.

Появление такой серии гомологических мощных вспышек было связано с двумя особенностями группы. Первая – группа находилась в холме крупномасштабного магнитного поля. Она включала в себя головное пятно и несколько мелких пятен. Корональные петли, выходявшие из пятна или его ближайшей окрестности, быстро замыкались, не поднимаясь на высоты более 30000км. Вторая особенность состояла в том, что с 24 ноября началось активное всплытие нового магнитного потока к юго-западу от головного пятна и в области, расположенной к северо-востоку от него, вне полутени, но достаточ-

но близко от нее. Появляющиеся мелкие пятна двигались от северо-восточной точки вокруг пятна по и против часовой стрелки со скоростью 150-300 м/с. В этой группе наблюдались сдвиговые движения на большем расстоянии от головного пятна, чем в событии перед вспышкой 13 декабря 2006. Этот фактор обусловил регулярное накопление энергии магнитной конфигурации и ее высвобождение посредством серии мощных вспышек. Мягкое рентгеновское излучение гомологических вспышек в АО 9236 согласуется с моделью квазистационарных петель без образования гигантских петель, характерных для длительных вспышек [17].

В ноябре 2000г многоволновые наблюдения Солнца на РАТАН-600 проводились в меридиане и в двух азимутах в диапазоне 1.7-30 см с анализом круговой поляризации. Время наблюдений на РАТАН-600 23, 24 и 26 ноября совпало с интервалами между вспышками, и на записях видна исключительная стабильность структуры локального источника микроволнового излучения этой АО между вспышками. Наиболее интересными представляются результаты, полученные 25 ноября, когда моменты наблюдений Солнца на РАТАН-600 в трех азимутах проводились за час до вспышки M3.5/2N, в момент, непосредственно предшествующий включению взрывного энерговыделения, и на фазе спада вспышки.

В **разделе 3.2** приводятся результаты наблюдений этой компактной вспышки на РАТАН-600. Отмечены следующие особенности в коротковолновой части микроволнового диапазона (2-5 см): за час до вспышки к западу от головного пятна зарегистрирован поляризованный источник, знак поляризации которого был обратным по сравнению с источником, отождествленным с головным пятном. Непосредственно перед вспышкой обратный знак поляризации у появившегося западного источника не регистрировался; отмечено уменьшение интенсивности источника над головным пятном на всех волнах используемого диапазона на 20-40 %, а также уменьшение его углового размера. На фазе затухания вспышки интенсивность источника, связанного с головным пятном, восстановилась, а спектр потока развившегося западного источника оказался практически плоским. Особенности эволюции поляризованного источника, по-видимому, вызваны вращением системы корональных петель, участвующих в сдвиговом движении.

Наблюдавшиеся изменения параметров и структуры микроволнового источника в процессе развития вспышки отразили эволюцию активной области. Основное энерговыделение локализовалось во вспышках в западной петле 24 и 25 ноября, а затем переместилось в петлю в южной части полутени основного пятна. Это отчетливо видно по положению источников жесткого

рентгеновского излучения по данным Yohkoh для обсуждаемых вспышек [18]. Изменения магнитотормозного излучения основного пятна и развившегося источника с противоположным знаком поляризации связаны со сложной эволюцией магнитной конфигурации. На коротких см-волнах за час до вспышки наблюдалась петля, соединявшая точку полутени основного пятна с точкой противоположной полярности. Сдвиговое движение приводит к изменению положения одного из оснований петли и возможному ослаблению магнитного поля противоположной полярности в ходе вспышки. Это проявляется в эволюции поляризованного источника на микроволнах.

На основе изучения микроволновых характеристик изолированной группы пятен, расположенной вдали от нейтральной линии крупномасштабного магнитного поля, выявлена связь эволюции поляризованного излучения области со сдвиговыми движениями пятен в группе. Соответствующее изменение магнитной конфигурации привело к возникновению серии быстрых мощных вспышек.

В **Главе 4** исследованы **нестационарные процессы с длительной фазой затухания (LDE)**. Современные наблюдательные данные позволяют различать отдельные эпизоды мощных вспышек, каждый из которых состоит из выброса (эрупции) и образования системы корональных петель, заполненных горячей плазмой. В некоторых случаях после образования плотных вспышечных петель происходит их свободное высвечивание. В других эпизодах петли или долго существуют вследствие дополнительного нагрева плазмы близ вершин, или происходит последовательное образование все новых и новых петель. На заключительной стадии таких событий наблюдается подъем всей системы постэруптивных петель – образуется гигантская арочная система. В этой главе рассмотрены отдельные этапы нестационарных (эруптивных) событий (LDE) различной мощности на основе комплексного анализа данных в широком энергетическом диапазоне, включая данные РАТАН-600.

Коротковолновые радионаблюдения на диске дают информацию о процессах вблизи солнечной поверхности на самой ранней стадии развития нестационарного явления. В **разделе 4.1** приведены результаты исследования эруптивного события на диске 23.11.2000г и связанных с ним явлений на Солнце.

Координаторами программы «МЕОС» было предложено следить за распавшейся активной областью NOAA 9238, в которой было зафиксировано дрожание волокна, что предвещало выброс волокна и корональный выброс массы (СМЕ). Эруптивное событие было вызвано всплыванием нового магнитного потока в группе 9231. Это привело к вспышке C5.4/1F в соседней, распавшейся накануне активной области NOAA 9238, выбросу волокна и

СМЕ, который распространялся со скоростью 500-600 км/с. Предэруптивная, эруптивная и постэруптивная фазы этого события были исследованы на основе данных в различных диапазонах: EUV (SOHO/EIT), мягкого рентгеновского (Yohkoh /SXT и GOES), микроволнового (1.76 см NoRH, 5.2 см ССРТ и 1.8-30 см, РАТАН-600) диапазонов. Привлекались также H_{α} фильтрограммы (Юнаньская Обсерватория), магнитограммы (SOHO/MDI) и изображения короны (SOHO/LASCO).

Радиоизлучение постэруптивной аркады было зарегистрировано на РАТАН-600 в виде протяженного интенсивного источника в том участке диска Солнца, где накануне произошла вспышка с выбросом волокна. Одновременно в этой же области наблюдалось яркое свечение в мягком рентгеновском диапазоне (Yohkoh/SXT) и в линиях УФ-диапазона (SOHO/EIT). На радиогелиографе Nobeyama (NoRH) и ССРТ также регистрировался интенсивный микроволновый источник до конца наблюдений на этих инструментах.

Полученные на РАТАН-600 спектральные характеристики радиоизлучения постэруптивной аркады (плоский спектр потока ($\simeq 2$ с.е.п.) и постоянный размер (70-80)" в диапазоне 1.7-7.5 см, спектр яркостных температур $T_b \sim \lambda^2$) соответствуют оптически тонкому тепловому тормозному излучению горячей плазмы. Это подтверждается оценкой потока радиоизлучения по данным GOES. Мера эмиссии излучающего источника по лучу зрения составила $EM = (3 - 6) \times 10^{28} \text{ см}^{-5}$, соответствующая электронная плотность $N_e = (2 - 3) \times 10^9 \text{ см}^{-3}$, температура плазмы 3-4 МК. Степень поляризации излучения по данным РАТАН составила (7-10) % на самой короткой волне используемого диапазона 1.8 см, что согласуется с данными на волне 1.76 см (NoRH). В рамках теплового тормозного механизма излучения в присутствии однородного магнитного поля по степени поляризации оценена напряженность продольной составляющей коронального магнитного поля $B \sim 200$ Гс на высоте около 10 тыс. км. Экстраполяцией фотосферного магнитного поля в потенциальном приближении получено $B = 75$ Гс [19]. Процесс формирования постэруптивной аркады продолжался более четырех часов и сопровождался проявлениями, характерными для вспышек, но со значительно более низкими энергетикой и темпом – продолжающимся энерговыделением в короне и перестройкой магнитно-петельной конфигурации, видимым расширением петель. По данным, полученным разными методами в разных диапазонах, сделаны оценки физических условий во время события, согласие которых подтверждает преимущественно тепловой характер процессов.

В разделе 4.2 приведены результаты микроволновых наблюдений на РАТАН-600 начальной фазы формирования постэруптивной аркады в собы-

тиях на лимбе 25.01.2007, 31.07.2004 и 2.12.2003.

1) В ходе наблюдений Солнца в диапазоне 1.8-5.0 см на РАТАН-600 в 7 азимутах с интервалом 35 минут было зарегистрировано микроволновое излучение развивающейся постэруптивной аркады в активном событии у восточного лимба 25 января 2007г, которое состояло из широкомасштабного СМЕ и связанной с ним вспышки C6.3 (GOES) за лимбом. В течение 3.5 часов над восточным лимбом наблюдался радиоисточник, максимум излучения которого проектировался на вершину формирующейся аркады (согласно наблюдениям в линии $195 \text{ \AA}$ на SOHO/EIT). Интенсивность микроволнового излучения была высокой непосредственно после вспышки в начале образования аркады, затем она заметно уменьшалась. Характер спектра полного потока излучения аркады менялся со временем. Через 30 мин – 1 час после максимума вспышки преобладало тепловое излучение с небольшой добавкой нетепловой компоненты. Параметры плазмы на начальной фазе формирования аркады, оцененные по микроволновому излучению, составили $T=5.2 \text{ MK}$ и $N_e = 2.3 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$. В дальнейшем интенсивность теплового излучения заметно падала. Данные метрового диапазона (ИЗМИРАН и Learmonth) показали, что через 3 часа после импульсной фазы этого события средней мощности нетепловые процессы отсутствовали.

2) Исследована эволюция микроволновых характеристик формирующейся постэруптивной аркады в активном событии на западном лимбе 31 июля 2004г. В зашедшей за лимб активной области произошли две последовательные вспышки C8.4 и C5.3 (GOES) с длительной фазой затухания (LDE). На LASCO/C2 был зарегистрирован СМЕ, двигавшийся со скоростью 1190 км/сек. Процесс подъема петель постэруптивной аркады наблюдался по данным SOHO/EIT ($195 \text{ \AA}$) в течение 15 часов. На РАТАН-600 в течение 4 часов регистрировалось радиоизлучение Солнца на ряде волн сантиметрового диапазона. Наблюдения проводились в пяти азимутах с интервалом в 1 час. Первое наблюдение было выполнено через 24 мин после максимума первой вспышки. Микроволновое излучение радиоисточника над западным лимбом, отождествленного с верхней частью постэруптивной аркады, было интенсивным на начальной стадии развития аркады и затем постепенно уменьшалось по мере подъема аркады. По данным RHESSI в ходе эруптивного события было отмечено возрастание рентгеновского потока в каналах 3-6, 6-12, 12-25 КэВ, максимум которого совпал с импульсной фазой вспышки. Спектры полного потока радиоизлучения аркады в диапазоне 1.8-5.0 см свидетельствовали о преимущественно тепловом тормозном излучении оптически тонкой плазмы на ранней стадии развития аркады с постепенным уменьшением до-

ли теплового излучения на более поздних фазах и о возрастании нетепловой компоненты, связанной, по-видимому, с ускоренными частицами. Этот вывод был подтвержден анализом спектров рентгеновского излучения по данным RHESSI. По микроволновому излучению аркады были определены параметры плазмы на ранней фазе ее образования: $T=1.5$ МК, $N_e = 5.1 \times 10^9 \text{ см}^{-3}$. Показана аналогия эволюции микроволновых характеристик формирующейся аркады в событиях 31.07.04 (на W-лимбе) и 25.01.07 (на E-лимбе). Различие параметров плазмы на ранней стадии формирования аркад для этих двух событий может быть связано с различным сценарием развития вспышек.

3) На западном лимбе Солнца 2 декабря 2003г произошло эруптивное событие, состоящее из выброса волокна, серии вспышек класса C (GOES), CME и обширного димминга. После импульсной фазы спектр регистрируемого микроволнового излучения формирующейся аркады (по данным РАТАН-600) свидетельствовал о доминировании теплового излучения.

В разделе 4.3 рассмотрены физические процессы в постэруптивных аркадах на фазе затухания LDE-событий.

Авторы ряда исследований постэруптивных аркад за два последних десятилетия неоднократно приходили к выводам о чрезмерно высокой поляризации их микроволнового излучения, предположительно из-за вклада излучения нетепловых электронов (например, [20, 21]); о продолжительности существования постэруптивных петель, значительно превосходящей оцениваемые времена охлаждения, из-за продолжающегося энерговыделения; о превышении плазменного давления магнитного давления (плазменная $\beta > 1$) в их горячих вершинах [22]. Ключевую информацию для проверки справедливости этих выводов и предположений дали наблюдения в высокотемпературной (8-10 МК) линии MgXII на комплексе КОРОНАС-Ф/СПИРИТ [23] в совокупности с микроволновыми наблюдениями на РАТАН-600 и данными других диапазонов солнечного излучения. При анализе комплекса данных было установлено, что все упомянутые факты получают подтверждение и объясняются в рамках стандартной модели вспышки («CSHKP») применительно к поздней постэруптивной стадии. В данном разделе приведены результаты комплексного анализа долгоживущих постэруптивных аркад в событиях на лимбе 2 ноября 1992г, 22 октября 2001г. и 28-30 декабря 2001г.

1) 2 ноября 1992г интенсивный источник радиоизлучения над лимбом был зарегистрирован на РАТАН-600 через 6 часов после мощной вспышки X9 (GOES) в зашедшей активной области. К этому времени над лимбом регистрировались высокие (50000 км) петли в линии H_α , над которыми, по данным Yohkoh/SXT, располагались группы диффузных рентгеновских петель

с ярким ядром в верхушке петель. Длительно регистрируемое жесткое рентгеновское излучение и продолжающиеся более 3 часов после начала вспышки микроволновые всплески свидетельствовали о длительном энерговыделении в области послевспышечной аркады. Наблюдаемое время охлаждения петель на стадии затухания события превосходило расчетное, что свидетельствовало о длительном поступлении энергии в аркаду после вспышки. По данным Yohkoh через 6 часов после вспышки в вершине аркады температура плазмы 10 МК и плотность $N_e = 3.5 \times 10^{10} \text{ см}^{-3}$. Магнитное поле, полученное как результат экстраполяции фотосферного магнитного поля на высоту 50000 км, равно 30 Гс. Соответственно, в вершине аркады $\beta = 2.7$, на что впервые было обращено внимание авторами работы [22]. Спектр потока радиоисточника (по данным РАТАН-600), отождествленного с верхней частью аркады, растущий с длиной волны в диапазоне (2-6) см, свидетельствует о наличии нетепловой компоненты в излучении этого источника.

2) 22 октября 2001г наблюдаемый на РАТАН-600 источник радиоизлучения над лимбом отождествлялся с аркадой петель, зарегистрированной в линиях УФ, мягком рентгене и на микроволнах на радиотелескопах NoRH и ССРТ. Аркада образовалась после трех корональных выбросов массы (СМЕ), один из которых сопровождался вспышкой M1/1F. В области верхушек петель в линии MgXII 8.42 Å (КОРОНАС/Ф) наблюдалось крупномасштабное яркое образование шарообразной формы. На основе комплексного анализа данных различных инструментов в разных энергетических диапазонах было определено, что через несколько часов после эруптивного события температура в вершине аркады $T=5.5-8$ МК и плотность $(5-9) \times 10^9 \text{ см}^{-3}$. Магнитное поле в области горячего коронального образования на высоте 100000 км составляет около 7 Гс (получено методом экстраполяции фотосферного поля в потенциальном приближении). Соответственно в вершине постэруптивной аркады $\beta > 1$. Данные микроволнового диапазона (РАТАН-600, NoRH и ССРТ) свидетельствуют о том, что в радиоизлучении коронального источника, отождествленного с вершиной аркады, присутствует нетепловая компонента. Этим объясняется и завышенная величина магнитного поля (около 300 Гс на высоте 100000 км), которая в предположении чисто теплового тормозного механизма излучения следует из полученной из наблюдений на NoRH и РАТАН-600 степени поляризации микроволнового источника, отождествленного с постэруптивной аркадой.

3) После эруптивных событий 28 октября 2001г, связанных с восходящей активной областью, состоящих из двух СМЕ, один из которых был высокоскоростной и сопровождался вспышкой балла X4, в течение двух дней над

лимбом наблюдалась аркада петель в линиях УФ, крупномасштабное образование в линии $\text{MgXII } 8.42 \text{ \AA}$ (КОРОНАС-Ф) и источник микроволнового излучения (РАТАН-600, NoRH) в короне на высоте 70-120 тыс. км. Температура плазмы – около 10 МК и плотность 10^{10} см^{-3} в горячем «магниевом» образовании, отождествленном с верхней частью постэруптивной аркады (по данным спектрогелиометра РЕС-К комплекса КОРОНАС-Ф/СПИРИТ). Расходящиеся с длиной волны в диапазоне 2-6 см потоки радиоисточников над лимбом, зарегистрированных на РАТАН-600 29 и 30 декабря, показывают наличие нетепловой компоненты в их излучении.

В результате комплексного анализа мощных нестационарных событий определены физические условия плазмы (температура 5-10 МК и плотность $5 \times 10^9 - 3 \times 10^{10} \text{ см}^{-3}$) в аркадах на поздней постэруптивной фазе и показано влияние вклада нетепловой компоненты в радиоизлучение вершин аркад. Полученные параметры свидетельствуют о продолжительном нагреве, длительном удержании ускоренных частиц в ловушках и возможном дополнительном ускорении частиц при затухании явлений.

Исследования постэруптивных арочных систем выявили несколько возможных сценариев их формирования. Для большинства слабых событий, связанных с выбросом волокон или с некоторыми рентгеновскими вспышками класса С, выявлено образование облака, заполненного горячей замагниченной плазмой на ранней стадии формирования постэруптивной аркады. В этих случаях тепловое тормозное излучение доминирует в микроволновом и мягком рентгеновском излучении источника, расположенного в непосредственной близости от вершины арок. Эти выводы подтверждаются результатами наблюдений в дециметровом и метровом диапазоне, а также в более жестком рентгеновском диапазоне по данным RHESSI. В мощных LDE-событиях вклад нетепловых процессов проявляется в широком диапазоне излучения как на импульсной фазе, так и на фазе затухания, и свидетельствует о длительном постэруптивном энерговыделении высоко в короне.

В **Заключении** перечисляются основные результаты работы. Делается вывод о важности проведения исследований нестационарных явлений на Солнце в микроволновом диапазоне, потенциал которых в настоящее время не исчерпан и не реализован в полной мере как для фундаментальных исследований солнечных эруптивных явлений, так и для практических целей их прогноза и оценки их геоэффективности (например, см. [24]); о необходимости, в частности, проведения спектрально-поляризационных радионаблюдений Солнца на РАТАН-600 в режиме многоазимутальных наблюдений для повышения временного разрешения радиотелескопа и для осуществления

двумерного многоволнового картографирования.

Положения, выносимые на защиту

1. Результаты обработки наблюдений на РАТАН-600 источников микроволнового излучения на диске и над лимбом, отождествленных с постэруптивными аркадами, и оценки основных характеристик их излучения на различных стадиях развития аркад.
2. В исследованиях эволюции спектральных и поляризационных характеристик микроволнового излучения вспышечно-активных изолированных областей в ноябре 2000г., декабре 2006г. и др. по данным РАТАН-600 выявлено появление в структуре области за 2-4 дня до мощной вспышки «пекулярного» радиоисточника, развитие которого отражает изменение магнитной конфигурации в результате сдвиговых и вращательных движений, всплытия нового магнитного поля.
3. На ранней постэруптивной фазе событий средней мощности в магнитосфере активной области образуется облако горячей плазмы, тепловое излучение которого доминирует в микроволновом и мягком рентгеновском излучении. Источник этого излучения располагается непосредственно над вершинами корональных петель, наблюдаемых в крайнем ультрафиолете.
4. В результате комплексного анализа нестационарных процессов в мощных эруптивных вспышках с длительной фазой затухания (LDE) с привлечением спектрально-поляризационных наблюдений на РАТАН-600 оценены параметры плазмы в аркадах на поздней постэруптивной фазе ($T = 5-10$ МК, плотность $5 \times 10^9 - 3 \times 10^{10} \text{ см}^{-3}$); показано наличие вклада нетепловой компоненты в радиоизлучение аркад, что свидетельствует о продолжительном нагреве и длительном удержании ускоренных электронов в магнитных ловушках.

Научная новизна работы

1. **Впервые** исследована динамика вспышечных корональных петель в эруптивных событиях различной мощности на диске и на лимбе с привлечением результатов многоволновых спектрально-поляризационных наблюдений Солнца на РАТАН-600.

2. **Впервые** показано, что развитие «пекулярного» источника микроволнового излучения, выявленного по эволюции спектральных и поляризационных характеристик микроволнового излучения активной области за несколько дней до мощной вспышки, отражает изменение магнитной конфигурации в результате сдвиговых и вращательных движений элементов области.

3. **Впервые** показано, что на ранней постэруптивной фазе событий средней мощности образуется большое облако горячей замагниченной плазмы, тепловое излучение которой доминирует в микроволновом и мягком рентгеновском излучении источника в районе вершин аркад.

4. **Впервые** спектрально-поляризационные наблюдения Солнца на РАТАН-600 использованы в комплексном анализе физических процессов и определении параметров плазмы в постэруптивных аркадах на фазе затухания LDE-событий.

Научное и практическое значение работы

Полученные результаты, касающиеся исследования динамики вспышечных петель, определения параметров плазмы и физических процессов в постэруптивных аркадах на разных фазах их развития позволяют построить адекватный сценарий развития вспышек различных типов, создать модель и развить теорию вспышек, понять природу эруптивных процессов на Солнце и выяснить, какие факторы влияют на формирование межпланетной среды и от чего зависит геоэффективность проявлений солнечной активности.

Выявление «пекулярного» источника в микроволновом излучения активной области за несколько дней до мощных (геоэффективных) вспышек следует учитывать при создании научно-обоснованных методов прогноза солнечных эруптивных событий, воздействующих на околоземное пространство и земную атмосферу.

Результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1*. V.V. Grechnev, V.G. Zandanov, A.M. Uralov, V.P. Maksimov, V.G. Rudenko, V.N. Borovik, G.B. Gelfreikh, I.Y. Grigorieva, V.G. Medar, A.N. Korzhavin, Observations of CME-related phenomena in a wide spectral range. // Sol. Phys., 2004, V. 225, P. 379–401.

2*. V.V. Grechnev, V.G. Zandanov, A.M. Uralov, V.P. Maksimov, V.G. Rudenko, V.N. Borovik, G.B. Gelfreikh, I.Y. Grigorieva, V.G. Medar, A.N. Korzhavin, Observations of CME-related phenomena in a wide spectral range. // Proc. IAU Symp. № 223 «Multi-wavelength investigations of solar activity» / Eds. A.V. Stepanov, E.E. Benevolenskaya, A.G. Kosovichev, St.-Pb, June 14-19, 2004, P. 725.

3*. Borovik V. N., Grechnev V. V., Bugaenko O. I., Bogachev S. A., Grigorieva I. Y., Kuzin S. V., Lesovoi S. V., Livshits M. A., Pertsov A. A., Rudenko G. V., Slemzin V. A., Stepanov A. I., Shibasaki K., Uralov A. M., Zandanov V. G., Zhitnik I. A., Observations of a CME-associated post-eruptive arcade on October 22, 2001 with CORONAS-F, other spaceborne telescopes, and in microwaves. // Proc. IAU Symp. № 226 «Coronal and Stellar Mass Ejections» / Eds. K. P. Dere, J. Wang, Y. Yan, Cambridge, University Press, 2005, P. 108–109.

4*. Grechnev V.V., Uralov A.M., Zandanov V.G., Rudenko G.V., Borovik V.N., Grigorieva I.Y., Slemzin V.A., Bogachev S.A., Kuzin S.V., Zhitnik I.A., Pertsov A.A., Shibasaki K., Livshits M.A., Plasma parameters in a post-eruptive arcade observed with CORONAS-F/SPIRIT, Yohkoh/SXT, SOHO/EIT, and in microwaves. // Publ. Astron. Soc. Japan, 2006, V. 58, P. 55–68.

5*. I.Y. Grigoryeva, L.K. Kashapova, M.A. Livshits, V.N. Borovik, Microwave observations with the RATAN-600 radio telescope: detection of the thermal emission sources. // Proc. IAU Symp. № 257

«Universal Heliophysical Processes» / Eds. N. Gopalswamy, D.F. Webb, Ioannina, Greece, 15-19 Sept., 2008, P. 177–179.

6*. I.Yu. Grigoryeva, V.N. Borovik, M.A. Livshits, V.E. Abramov-Maximov, L.V. Opeikina, V.M. Bogod, A.N. Korzhavin, Post-eruptive arcade formation in 25 January, 2007 CME/flare limb event: microwave observations with the RATAN-600 radio telescope. // Sol. Phys., 2009, V. 260(1), P. 157–175.

7*. Боровик В.Н., Гельфрейх Г.Б., Гречнев В.В., Григорьева И.Ю., Медарь В.Г., Наблюдения постэруптивной аркады в различных диапазонах солнечного излучения. // Труды науч. конф. стран СНГ и Прибалтики «Активные процессы на Солнце и звездах», С.-Пб, 2002, С. 148–151.

8*. V.N. Borovik, G.B. Gelfreikh, V.G. Medar, I.Yu. Grigorieva, First registration of the post-eruptive arcade formation during CME event in wide microwave range. // Proc. X Europ. Sol. Phys. Meeting «Solar Variability: From Core to outer Frontiers», Prague, Czech Republic, 9-14 Sept., 2002, (ESA SP-506, December 2002), P. 431–434.

9*. Боровик В.Н., Лившиц М.А., Григорьева И.Ю., Медарь В.Г., Чернетский В.А., Эволюция группы NOAA 9236 и вспышечное энерговыделение по данным РАТАН-600. // Труды науч. конф. стран СНГ и Прибалтики «Актуальные проблемы физики солнечной и звездной активности», 2-7 июня, 2003, Н.Новгород, С. 63–66.

10*. Гречнев В. В., Занданов В. Г., Максимов В. П., Боровик В. Н., Гельфрейх Г. Б., Григорьева И. Ю., Медарь В. Г., Наблюдения солнечных явлений, связанных с корональным выбросом массы, в широком спектральном диапазоне. // Труды науч. конф. стран СНГ и Прибалтики «Актуальные проблемы физики солнечной и звездной активности», 2-7 июня, 2003, Н.Новгород, С. 409-412.

11*. Максимов В.П., Гречнев В.В., Боровик В.Н., Григорьева И.Ю., Эволюция вспышечно-активной группы пятен (NOAA 9236, ноябрь 2000г.) по наблюдениям в микроволновом диапазоне на ССРТ, НоРГ и РАТАН-600. // Труды науч. конф. стран СНГ и Прибалтики «Актуальные проблемы физики солнечной и звездной активности», 2-7 июня, 2003, Н.Новгород, С. 124-127.

12*. Гречнев В.В., Боровик В.Н., Григорьева И.Ю., Гельфрейх Г.Б., Коржавин А.Н., Кузин С.В., Занданов В.Г., Руденко Г.В., Уралов А.М., Житник И.А., Перцов А.А., Слемзин В.А., Магнитные поля в постэруптивных аркадах. // Сборник «Солнечно-земная физика», ИСЗФ, Иркутск, 2004, вып.6, С. 110–112.

13*. Боровик В.Н., Григорьева И.Ю., Постэруптивные аркады по наблюдениям в микроволновом диапазоне на радиотелескопе РАТАН-600. // Труды VII Конф. Молодых Ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом», БШФФ, Иркутск, 2004, вып.7, С. 162–165.

14*. Боровик В.Н., Абрамов-Максимов В.Е., Гараимов В.И., Григорьева И.Ю., Кальтман Т.И., Коржавин А.Н., Медарь В.Г., Микроволновые наблюдения послевспышечных петель на РАТАН-600 2 ноября 1992г. // Труды Всерос. конф. «Экспериментальные и теоретические исследования основ прогнозирования гелиофизической активности», ИЗМИРАН, Троицк, 10-15 окт., 2005г. / Ред. В.Н. Обридко и В.В. Зайцев, Троицк, Московская обл., С. 41–46.

15*. Боровик В.Н., Абрамов-Максимов В.Е., Григорьева И.Ю., Опейкина Л.В., Богод В.М., Коржавин А.Н., Эволюция активной области AR 0930, связанной с геоэффективной вспышкой X3.4/4B 13 декабря 2006, по наблюдениям в микроволновом диапазоне. // Труды XI Пулковской междунар. конф. по физике Солнца «Физическая природа солнечной активности и прогнозирование ее геофизических проявлений», ГАО РАН, Пулково, С.-Пб, 2-7 июля 2007 г., С. 67–68.

16*. Боровик В.Н., Лившиц М.А., Абрамов-Максимов В.Е., Григорьева И.Ю., Опейкина Л.В., Богод В.М., Коржавин А.Н., Микроволновые наблюдения на РАТАН-600 постэруптивной фазы нестационарного явления 25 января 2007 г. // Труды XI Пулковской междунар. конф. по фи-

зике Солнца «Физическая природа солнечной активности и прогнозирование ее геофизических проявлений», ГАО РАН, Пулково, С.-Пб, 2-7 июля 2007 г., С. 69–70.

17*. Боровик В.Н., Гречнев В.В., Абрамов-Максимов В.Е., Григорьева И.Ю., Богод В.М., Кальтман Т.И., Коржавин А.Н., Постэруптивные процессы на Солнце по многоволновым наблюдениям на РАТАН-600. // Труды Всерос. конф. «Многоволновые исследования Солнца и современные проблемы солнечной активности», САО РАН, п. Н.Архыз, КЧР, 28 сен.-2 окт. 2006г.// С.-Пб, 2007, С. 370–397.

18*. Григорьева И.Ю., Боровик В.Н., Кашапова Л.К., Формирование постэруптивной аркады в активном событии на лимбе 31 июля 2004г по микроволновым наблюдениям на РАТАН-600. // Труды Всерос. ежегодной конф. по физике Солнца, «Солнечная и солнечно-земная физика – 2009», ГАО РАН, Пулково, С.-Пб, 5-11 июля 2009 г., С. 69–70.

ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. *Тохчукова С.Х.* // Препринт САО РАН, 2002, № 174, п.Н.Архыз. С. 27.
2. *Богод В.М.* // Труды Всерос. конф. «Многоволновые исследования Солнца и современные проблемы солнечной активности», САО РАН, п. Н.Архыз, КЧР, 28 сен.-2 окт. 2006г.// С.-Пб, 2007, С. 2–26.
3. *Гараимов В. И.* // Препринт САО РАН, 1997, п.Нижний Архыз, 127Т.
4. *Akhmedov Sh.B., Borovik V.N., Gelfreikh G.B. et al.* // *ApJ*. 1986. V. 301. P. 460–464.
5. *Боровик В. Н., Драке Н. А., Коржавин А. Н. и др.* Эволюция и структура вспышечно-активной области HR 16631 (февраль 1980г) по наблюдениям на РАТАН-600. // *Кинематика и физика небесных тел*. 1989. вып.5. № 1. С. 63–67.
6. *Sotou B.V.* // *A. & A.* 1986. V. 163. № 2. P. 210–218.
7. *Ватрушин С.М., Коржавин А.Н.* // Науч. труды VI семинара «Физика солнечной плазмы». / Ред. Сомов Б. В., Фомичев В. В., М.: Наука. 1989. С. 100–106.
8. *Руденко И.Г., Руденко Г.В., Уралов А.М.* // Труды Всерос. конф. «Многоволновые исследования Солнца и современные проблемы солнечной активности», САО РАН, п. Н.Архыз, КЧР, 28 сен.-2 окт. 2006г.// С.-Пб, 2007, С. 462–474.
9. *Уралов А.М., Руденко Г.В., Гречнев В.В. и др.* // Труды Всерос. конф. «Многоволновые исследования Солнца и современные проблемы солнечной активности», САО РАН, п. Н.Архыз, КЧР, 28 сен.-2 окт. 2006г.// С.-Пб, 2007, С. 484–514.
10. *Tokhchukova S.Kh., Bogod V.M.* // *Sol. Phys.* 2003. V. 212. Iss. 1. P. 99–109.
11. *Bogod V.M., Yasnov L.V.* // *Sol. Phys.* 2009. V. 255. Iss. 2. P. 253–271.
12. *Кардаполова Н.Н., Борисевич Т.П., Петерова Н.Г. и др.* // *АЖ*, 2008, Т. 85. № 5. С. 460–470.
13. *Борисевич Т.П., Ильин Г.Н., Коржавин А.Н. и др.* // *Косм. Иссл.* 2004. Т. 42. № 6. С. 585.
14. *Язев С.А., Савинкин М.Ю.* // Труды ВАК-2007, Казань. 2007. С. 73.
15. *Борисевич Т.П., Венгер А.П., Зверев Ю.К. и др.* // Труды XI Пулковской Межд. конф. по физике Солнца, 2007, сс. 63–66.
16. *Лившиц М.А., Бадалян О.Г.* // *АЖ*, 2004, Т. 81. № 12. С. 1138–1152.
17. *Боровик В.Н., Медарь В.Г., Тохчукова С.Х.* // Труды Межд. конф. «Солнце в эпоху смены знака магнитного поля», Пулково, С.-Пб, 2001. С. 57–64.
18. *Nitta N., Hudson H.S.* // *Geoph. Res. Lett.* 2001. V. 28. Iss. 19. P. 3801–3804.
19. *Rudenko G.V.* // *Sol. Phys.* 2001. V. 198. Iss. 1. P. 5–30.
20. *Urpo S., Krüger A., Hildebrandt, J.* // *A. & A.* 1986. V. 163. P. 340–342.
21. *Borovik V.N., Gelfreikh G.B., Bogod V.M. et al.* // *Sol. Phys.* 1989. V. 124. Iss. 1. P. 157–166.
22. *K. Ichimoto, T. Sakurai, Flare Telescope, Norikura Team.* // *Proc. 2-nd Japan-China Seminar on Sol. Phys.* 1994. P. 151–156.
23. *Zhitnik I.A., Bugaenko O.I. et al.* // *MNRAS*. 2003. V. 338. P. 67–71.

24. *Гречнев В.В.* // Труды Всерос. конф. «Многоволновые исследования Солнца и современные проблемы солнечной активности», САО РАН, п. Н.Архыз, КЧР, 28 сен.-2 окт. 2006г.// С.-Пб, 2007, С. 27–64.

Апробация работы

Результаты диссертации докладывались на следующих международных и всероссийских конференциях: Конф. стран СНГ и Прибалтики, ГАО, июнь, С.-Пб, (2002) и Н.Новгород (2003); 10th ESPM, Prague, Czech Republic, Sept. 9-14, 2002г; Конф. памяти ак. А.Б.Северного, п.Научный, КрАО, июнь, 2003; Nobeyama Symp. 2004, Seisen-Ryo, Kiyosata, Japan, Oct. 26-29, 2004; VII Пулковская межд. конф. по физике Солнца, июль, 2003, ГАО РАН, Пулково, С.-Пб; Всерос. конф., посвященная 90-летию со дня рождения член.-корр. РАН В.Е.Степанова, Иркутск, авг., 2003; IAUS 223, St.-Pb, Pulkovo, Russia, June 14-19, 2004; Межд. конф., Иркутск, сент., 2004; Междунар. Байкальская молодеж. науч. школа по фундаментальной физике; YII Конф. молодых ученых, Иркутск, сент. 2004; Межд. конф., ИЗМИРАН, Троицк, 31 янв.-5 фев. 2005г; IX Пулковская Межд. конф. по Физике Солнца, ГАО РАН, Пулково, С.-Пб, июль, 2005; Всерос. конф., ИЗМИРАН, Троицк, окт., 2005; X Пулковская межд. конф. по физике Солнца, ГАО РАН, Пулково, С.-Пб, сент. 2006; IX Rus.-Fin. Symp. on Radio Astronomy, 15-20 Oct. 2006, Nizhniy Arkhyz; Всерос. конф., 28 сен.-2 окт. 2006, САО РАН, Н.Архыз; CESRA, Workshop, June 12-16, 2007, Ioannina, Greece; XI Пулковская межд. конф. по физике Солнца, июль, 2007, ГАО РАН, Пулково, С.-Пб; Всерос. астрономич. конф. ВАК-2007, Казань, сент. 2007; IHU2007-NISTP, Nov. 5-11, 2007, Zvenigorod, Moscow Region, Russia; Всерос. ежегод. конф. по физике Солнца, 7-12 июля 2008, ГАО РАН, Пулково, С.-Пб; I Молодеж. Науч. Конф. ГАО РАН, июнь, 2008, Пулково, С.-Пб; 12th ESPM, Sept. 8-12, 2008, Freiburg, Germany; IAUS 257, Sept. 15-19, 2008, Ioannina, Greece; Конф. по физике Солнца, КрАО, п.Научный, сент., 2008; Межд. семинар, ГАС ГАО, Кисловодск, 30 сен.-4 окт., 2008; JENAM, Europ. Week of Astronomy and Space Science 2009, Apr. 20-23, 2009, Hertfordshire, London, UK; Всерос. ежегодная конф. по физике Солнца, июль, 2009, ГАО РАН, Пулково, С.-Пб; Конф. по физике Солнца в КрАО, п.Научный, сент., 2009; IHU-ISWI Regional Meeting, Sept. 7-13, 2009, Sibenik, Croatia.

Личный вклад автора

Во всех работах [1*-18*] автор принимал участие в обработке наблюдательных данных, полученных на РАТАН-600, и сопоставлении их с данными других инструментов; в решении ряда методических задач; в анализе и интерпретации результатов наблюдений, а также в постановке задачи и выборе наблюдательного материала в работах [5*, 6*, 18*].

Благодарности

Автор приносит глубокую благодарность за всестороннюю консультацию проф. М.А. Лившицу, а также: В.В. Гречневу, проф. Г.Б. Гельфрейху, А.Н. Коржавину и Л.К. Кашаповой за полезную дискуссию и помощь при выполнении работы; И.М. Чертоку и Г.П. Чернову за предоставление радиоданных (ИЗМИРАН); коллективу сотрудников САО (рук. М.Г. Мингалиев) и СПбФСАО (рук. В.М. Богод) за обеспечение регулярных наблюдений Солнца на РАТАН-600 и всем соавторам.

Работа выполнена при поддержке грантов: РФФИ 02-02-16548, 03-02-17357, 06-02-16838, 06-07-89002, 08-02-00872; INTAS-181; ОФН РАН, ФНТЦП Договор 16 КИ и др.