

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
СПЕЦИАЛЬНАЯ АСТРОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ

На правах рукописи

Тохчукова Сусанна Хасановна

**ИССЛЕДОВАНИЯ СОЛНЦА НА РАТАН–600
В МНОГОАЗИМУТАЛЬНОМ РЕЖИМЕ**

Специальность 01.03.02 — астрофизика и радиоастрономия

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата физико–математических наук

Научный руководитель
д.ф.–м.н. Богод
Владимир Михайлович

Н.Архыз – С.Петербург, 2002

Оглавление

Введение	3
Часть I. Методика многоазимутальных наблюдений	13
1 Реализация метода многоазимутальных наблюдений Солнца на РАТАН-600.	14
1.1 Введение	14
1.2 Методические особенности многоазимутальных наблюдений Солнца в антенной системе "Южный сектор с перископическим отражателем".	18
1.3 Описание программы RAIS (RATAN-600 Azimuthal Image Synthesis)	26
1.3.1 Основные концепции	26
1.3.2 Методика использования программы RAIS	29
1.3.3 Входные данные	33
1.3.4 Расчет одномерных диаграмм направленности антенны	37
1.4 Результаты картографирования	42
1.5 Методика разделения поясов активности на Солнце при сканировании ножевой диаграммой	43
1.6 Использование методики сдвига ДНА по высоте для определения ошибок наведения антенны по высоте в азимутах .	45
1.7 Программное обеспечение для исследования временных вариаций излучения солнечных структур и сопоставления с данными других обсерваторий	47
1.7.1 Программа FITSRAT для сопоставления данных РАТАН-600 с данными других обсерваторий	47
1.7.2 Программа WEVERAT для вейвлет-анализа данных РАТАН-600	48

1.7.3	Результаты обработки и перспективы применения метода	50
1.8	Заключение	53
Часть II. Результаты многоазимутальных наблюдений		54
Введение		54
	Исследования предвспышечных явлений в микроволновом диапазоне (обзор)	54
	Некоторые наблюдения особенностей микроволнового излучения вспышечных АО по данным РАТАН-600	61
2	Микроволновое "потемнение" активной области NOAA 9077 перед протонной вспышкой 14 июля 2000г.	69
2.1	Введение	69
2.2	Обзор наблюдательных данных и методика их обработки .	71
2.2.1	Данные РАТАН-600	71
2.2.2	Данные NRH	76
2.2.3	Данные ССРТ	76
2.2.4	Обсуждение результатов наблюдений	79
2.3	Интерпретация наблюдаемых явлений	79
2.4	Выводы	83
3	Исследование предвспышечного излучения активных областей производящих мощные вспышки.	84
3.0.1	Эффект коротковолновой инверсии знака поляризации	85
3.0.2	Эффект коротковолнового уярчения поляризации .	89
3.0.3	Частотная область с многократными инверсиями в спектре поляризации радиоизлучения	89
3.0.4	Результаты статистического исследования	95
3.0.5	Обсуждение результатов	96
3.1	Выводы	100
Заключение		103
Литература		104

Введение

Исследование природы вспышечной активности Солнца является актуальной проблемой современной астрофизики. Развитие наблюдательной техники и методики способствует получению новых данных о процессах, происходящих в атмосфере Солнца, и разработке эффективных методов прогнозирования мощных геоэффективных вспышек. Несмотря на большое количество запущенных в последние годы спутниковых обсерваторий от Skylab до Rhesi, наземные исследования в радиодиапазоне не потеряли свою значимость и в наши дни, так как они дают уникальную, не дублируемую другими методами информацию о магнитных структурах на уровнях хромосферы и нижней короны. Радио наблюдения на крупных инструментах с высоким пространственным разрешением (VLA и OVRO (США), Nobeyama (Япония), ССРТ и РАТАН-600 (Россия)) позволяют исследовать детальную структуру солнечных образований, и способны регистрировать весьма небольшие изменения параметров солнечной плазмы - магнитных полей, температуры и плотности, в области солнечной атмосферы, где развиваются предвспышечные явления и происходит накопление энергии, что недоступно для измерения в других диапазонах. Однако каждый из этих инструментов имеет свои ограничения, определяющие его круг задач.

На сегодняшний день в мире не существует адекватного радиотелескопа (по спектральному разрешению и диапазону, чувствительности и точности поляризационных измерений) для изучения свойств плазмы на ранней стадии зарождения вспышек, поэтому наблюдательные данные о предвспышечных изменениях в активной области в радиодиапазоне часто неполны, трудно классифицируемы и порой противоречивы. Самый известный спектральный критерий Танаки-Эноме подвергался многочисленным ревизиям и имеет оправдываемость не более 70%.

Как показали практические наблюдения, радиотелескоп РАТАН-600 в сочетании с широкодиапазонным Панорамным Анализатором Спек-

тра имеет уникальные характеристики (высокая чувствительность по потоку (несколько янских), высокая точность измерения степени поляризации ($< 0.03\%$), хорошее спектральное разрешение (5%) в широком диапазоне микроволн (от 1 до 30 см)), которые дают возможность изучения тонких спектрально-поляризационных изменений в магнитосферах активных областей Солнца на уровне, не доступном для регистрации другими инструментами (ССРТ, Нобеяма, VLA). Благодаря уникальному сочетанию таких параметров, на этом инструменте были получены важные результаты в исследованиях Солнца: предложено несколько методов измерения магнитных полей; разработана концепция магнитосфер активных областей; обнаружена радиогрануляция; получены спектры отдельных компонент (пятенные источники, гало, протуберанцы) локальных источников радиоизлучения, получены доказательства существования длительных нетепловых процессов в солнечной короне; получены экспериментальные доказательства существования циклотронных линий излучения; измерено магнитное поле в корональной дыре и другие новые результаты.

В то же время возможности радиотелескопа РАТАН-600 для исследования Солнца еще не до конца реализованы. Предусмотренный в проекте режим многократных наблюдений в азимутах был дважды опробован в ограниченном варианте, но из-за методических и технических трудностей регулярно не использовался. Стандартно наблюдения проводились в транзитном режиме в меридиане, что ограничивало применение этого инструмента для исследования тонких особенностей радиоизлучения в спектре и поляризации предвспышечного состояния солнечной плазмы и их вариаций.

В период 1999-2002 гг был проведен комплекс работ по реализации нового режима наблюдений - режима многократного сканирования в азимутах на Южном секторе с Перископическим отражателем. Сейчас этот режим позволяет проводить квазисопровождение Солнца в течение 4- 4.5 часов с временным разрешением около 4 минут. В периоды, когда склонение Солнца принимает экстремальные значения, использование многоазимутальных наблюдений позволяет восстанавливать по одномерным проекциям (сканам) двумерные изображения стабильных областей с пространственным разрешением до $17 \times 150''$ одновременно на 20 длинах волн в диапазоне от 1.74 до 15 см. Для реализации многоазимутального режима наблюдений были проведены методические исследования и раз-

работано программное обеспечение, которое описано в данной работе. Внедрение нового режима наблюдений позволило исследовать динамику предвспышечного состояния активных областей Солнца, и в результате обнаружить несколько тонких спектрально- поляризационных особенностей микроволнового излучения локальных источников активных областей, в которых происходили мощные вспышки.

Основными целями работы являются:

- Внедрение в регулярное пользование режима многоазимутальных наблюдения Солнца на южном секторе РАТАН-600 с плоским отражателем.
- Разработка программного обеспечения для обработки многоазимутальных наблюдений и микроволнового картографирования.
- Использование многоазимутального режима для исследования ранней стадии предвспышечного состояния солнечных активных областей.

Научная новизна работы. Внедрен в регулярное пользование новый режим многоазимутальных наблюдений Солнца, который впервые позволил исследовать на РАТАН-600 предвспышечную динамику структуры солнечных активных областей с временным разрешением до 4 минут в течение 4,5 часов. Благодаря этому удалось обнаружить новые эффекты в поляризованном излучении в сантиметровом диапазоне, которые являются проявлениями в радиодиапазоне ранней подготовительной стадии солнечных вспышек. Получены новые данные о динамике предвспышечной фазы вспышечно-продуктивных активных областей (ВПАО). Статистическое исследование свойств этих эффектов в течение года регулярных наблюдений в многоазимутальном режиме позволило исследовать временные характеристики и диапазон частот, в котором наблюдаются обнаруженные эффекты.

Разработано новое программное обеспечение для анализа временных вариаций радиоизлучения по данным наблюдений в азимутах с использованием вейвлет-анализа, а также программное обеспечение для микроволнового картографирования, которое позволяет получать одновременные двумерные изображения солнечных активных областей на 15

длинах волн в диапазоне 2- 15 см, в интенсивности и круговой поляризации.

Научное и практическое значение.

1. Разработана и внедрена в практику регулярных наблюдений методика многократного сканирования радиоисточников в азимутах на Южном секторе с Плоским отражателем. Применение новой методики к наблюдениям Солнца позволило получить новые данные о существовании ранней подготовительной стадии в предвспышечной фазе для мощных вспышечных событий. Данные могут быть использованы как для развития теории солнечных вспышек, так и для разработки метода их эффективного прогноза. Реализация данного режима наблюдений также открывает перспективы для других (не солнечных) направлений исследований на РАТАН-600.
2. Разработано программное обеспечение по обработке многоазимутальных наблюдений (многоволновое картографирование, сопоставление с данными других обсерваторий), которое внедрено в регулярное пользование на РАТАН-600. Достигнута полная автоматизация первичной обработки данных многоазимутальных наблюдений, что значительно сокращает время, необходимое для анализа данных. Для разработки ПО использовался общепринятый для солнечных наблюдений язык программирования IDL (с поддержкой Astrolib и формата SOHO FITS), что позволяет эффективно сопоставлять данные РАТАН-600 с данными других обсерваторий.
3. Разработана методика и программное обеспечение для анализа вариаций радиоизлучения по многоволновым многоазимутальным данным РАТАН-600 с применением вейвлет-анализа. Это позволило обнаружить квазипериодические колебания в деталях локальных радиоисточников на Солнце с периодами около 80, 50 и 30 минут. Дальнейшее исследование спектральных и временных свойств этих колебаний, а также развитие метода для исследования колебаний с меньшими периодами представляет несомненный интерес для физики Солнца.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка цитируемой литературы.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована ее цель, новизна и научная значимость, перечислены выносимые на защиту положения, указано, где диссертация прошла апробацию, а также приведено краткое изложение содержания диссертационной работы.

В первой главе описывается методика наблюдений в многоазимутальном режиме на ЮП и обосновывается необходимость улучшения комплексных параметров радиотелескопа для исследования радиоизлучения Солнца. В сочетании с Панорамным Анализатором Спектра (ПАС) [15] радиотелескоп является уникальным инструментом для солнечных исследований, позволяющим вести параллельный прием в широком диапазоне волн с 5%-ным спектральным разрешением, с высокой чувствительностью по потоку (несколько миллианских) и высокой точностью измерения степени поляризации (доли процента). Конструкция телескопа позволяет реализовать множество различных режимов наблюдений, включая несколько методов картографирования и квазисопровождения [107], в том числе в антенной системе ЮП. Однако до настоящего времени ЮП РАТАН-600 использовался, в основном, для получения одномерных сканов радиоисточников в режиме прохождения через меридиан.

Предпосылками для внедрения многоазимутального режима послужили:

- создание Панорамного Анализатора Спектра, перекрывающего широкий микроволновый диапазон с подробным спектральным анализом;
- полная автоматизация установки отражательных элементов южного сектора РАТАН-600 и перископического отражателя;
- установка на Облучатель N3 высокоточного цифрового привода с управлением от компьютера и достижение быстрой и точной установки его в определенный азимут;
- развитие вычислительной техники, используемой для сбора и обработки данных, которая расширила возможности для многократных наблюдений и быстрого многоволнового синтеза изображений.

В главе приводится описание методических особенностей при работе с одномерной диаграммой и рассмотрено влияние различных ошибок, возникающих при реализации многоазимутального режима наблюдений.

Приведено описание различных программ математического обеспечения разработанных автором на языке программирования IDL, который широко используется для обработки солнечных данных во всем мире, а также на языке C++ в ОС Win32.

Необходимость разработки нового математического обеспечения для нового режима определяется тем, что для взаимной привязки азимутальных данных необходимо провести коррекцию ошибок, специфических для азимутальных наблюдений, а также для работы с большими массивами данных (61 (азимутов) $\times$ 36 (длин волн) $= 2196$ массивов одномерных изображений Солнца в день) необходимо автоматизировать всю первичную обработку, обеспечить удобство регулярного сопоставления сканов в азимутах по длине волны, автоматизировать подготовку данных для вейвлет - анализа и т.п. Современный уровень работы с данными солнечных наблюдений, получаемых как на РАТАН-600, так и на других инструментах, требует повышения качества изображений, представления данных в виде, удобном для восприятия и анализа, и обеспечения удобства пользования программным обеспечением. Кроме того, возросшие возможности вычислительной техники уже не накладывают ограничения на объем вычислений, необходимый для картографирования на ЮП.

Для эффективного отождествления данных, полученных в многоазимутальном режиме, разработана программа FITSRAT, которая позволяет просматривать одномерные и двумерные данные других обсерваторий, работающих в разных диапазонах (рентген, ультрафиолет, оптика, радио) в формате FITS, и определять простые параметры источников (поток, координаты). Программа включает в себя функцию свертки карт с двумерной диаграммой РАТАН-600 с записью полученных одномерных сканов в формате стандартной программы обработки WorkScan[52], что дает возможность более детального сопоставления данных. Для исследования временных вариаций излучения солнечных структур методом вейвлет - анализа многоазимутальных данных РАТАН-600 предназначена программа WEVERAT.

В этой же главе приводится подробное описание методики многоволнового картографирования солнечных активных областей из наблюде-

ний на ЮП. Ранее методика восстановления двумерных изображений по проекциям была реализована другими авторами [101],[105], но используемое в то время программное обеспечение на сегодняшний день морально устарело. Последний пакет программ на языке FORTRAN в операционной системе ДОС был жестко привязан к старому формату наблюдений (который использовался до 1995 года), имел принципиальное ограничение на количество точек (что в свое время было оправдано целями экономии машинного времени при вычислениях), и мог обрабатывать за один раз только одну волну. Новый пакет программ (RAIS) [143] реализован в среде программирования IDL, с использованием стандартного формата FITS и библиотек Astrolib. Пакет совместим с программой WorkScan, имеет графический интерфейс, работает как в пакетном, так и в интерактивном режиме, и открыт для модификации пользователем. Установленный в настоящее время на Облучателе N3 солнечный многоволновый комплекс обеспечивает данные для построения одновременных карт на 15 длинах волн в диапазоне от 2 до 15 см. В программе RAIS реализована возможность строить карты всего диска Солнца одновременно на всех имеющихся длинах волн, с использованием в качестве входных данных наблюдений в режиме ЮП, а также в других режимах, в частности, в режиме "эстафета с зонированием" [45].

При одномерных наблюдениях Солнца часто возникает проблема разделения вклада излучения активных областей, находящихся в северном и южном полушариях, и одновременно попадающих в вертикальную диаграмму. Разработана методика разделения потоков путем сканирования активных широт на Солнце двумя разными квазилинейными участками вертикальной диаграммы направленности, которая решает эту задачу. Проведение многоазимутальных наблюдений попеременно с двумя значениями выноса ДНА по высоте дает возможность исследовать динамику областей, совпадающих по вертикали, что недоступно в режимах азимутального апертурного синтеза и при квазисопровождении с несмещенной вертикальной диаграммой.

Во введении ко второй и третьей главе приведен обзор разнообразных наблюдательных данных по радиоастрономическим исследованиям предвспышечных явлений. Отмечено, что большинство наблюдений имели ограничения либо по временной динамике излучения, либо проводились на одной частоте или с узким перекрытием частотного диа-

пазона, либо с недостаточным пространственным разрешением, либо с низкой точностью измерения степени поляризации, либо с низкой чувствительностью по потоку радиоизлучения и т.п. Несмотря на наличие в мире разнообразных радиотелескопов с высоким пространственным разрешением (от радиогелиографов - интерферометров до рефлекторных антенн), подробный анализ спектра реализуется лишь на двух телескопах – РАТАН-600 и OVRO, которые полностью перекрывают диапазон частот 1 - 18 ГГц. Последний анализирует этот диапазон частот последовательно, переходя от одной частоты к другой, и имеет узкие полосы анализа, что значительно понижает чувствительность измерения поляризации. Приходится констатировать, что сегодня в мире отсутствует радиоастрономический инструмент (или несколько инструментов), параметры которого были бы адекватны для исследования предвспышечной динамики магнитных структур на Солнце.

Вторая глава посвящена применению расширенных возможностей радиотелескопа к изучению предвспышечной динамики излучения активной области AR 8077. Хотя предвспышечные явления в спектрах активных областей регистрировались на РАТАН-600 и до реализации режима многоазимутальных наблюдений, однако при наблюдениях, проводимых один раз в день, установить достоверную связь между необычными явлениями в спектрах интенсивности и поляризации, и последующей вспышкой довольно трудно. Наблюдения с временным интервалом до 4 минут позволяют быть уверенными в наличии такой связи за счет неоднократных наблюдений одних и тех же эффектов и изучения их временных характеристик по отношению к моменту вспышки. Так, эффект предвспышечного микроволнового потемнения неоднократно регистрировался в многоволновых наблюдениях на РАТАНе перед мощными событиями на Солнце, генерирующими протоны высоких энергий. В главе рассматривается активная область AR 8077, которая произвела мощную протонную вспышку 14 июля 2000г. Она подробно исследовалась многими наземными и космическими обсерваториями, и получила название вспышки "Дня Бастилии".

Наблюдения на РАТАН-600 в широком диапазоне волн с подробным (5%) частотным анализом и с высокой чувствительностью по потоку излучения позволили зарегистрировать (по увеличению непрозрачности плазмы) процесс медленного накопления массы волокна, кото-

рый проявляется как эффект предвспышечного микроволнового потемнения (интенсивности излучения). Важная информация в пользу гипотезы формирования волокна также получена из спектральных поляризационных наблюдений: в течение всего предвспышечного периода регистрировался эффект двойной смены знака круговой поляризации излучения в узкой полосе (5%) частот в середине сантиметрового диапазона (4-5 см). Объяснение эффекта двойной смены поляризации рассмотрено в модели, согласно которой в солнечной плазме с инверсией температуры по высоте, избыток излучения х-моды сменяется избытком излучения о-моды. Проведено сопоставление данных РАТАН-600 с данными радиогелиографа в Нобеяма и ССРТ (Иркутск) и получены независимые подтверждения наблюдаемых эффектов. Наблюдения позволили предложить сценарий развития предвспышечной ситуации, который состоит в том, что над линией раздела полярностей магнитного поля создаются условия для постепенного формирования холодного волокна. Накапливаясь в течение нескольких дней, и прогибая магнитные арки под собой, масса волокна достигает критической величины, когда тяжелое газовое облако разрушает магнитную структуру аркады. Это инициирует процесс аннигиляции магнитного поля на низких (фотосферных) уровнях, где начавшаяся вспышка видна в белом свете, и на высоких уровнях (в короне), где она наблюдается в рентгене, УФ и радиодиапазоне.

Третья глава посвящена результатам исследования в микроволновом диапазоне тонких спектральных особенностей поляризованного излучения вспышечно-продуктивных активных областей (ВПАО) на предвспышечной фазе с использованием нового режима многократных наблюдений на РАТАН-600 в азимутах.

Выполненный нами анализ солнечных активных областей по данным NOAA SEC (см. <http://www.sel.noaa.gov/weekly/>) показал, что все активные области можно распределить на три класса: стабильные, умеренной активности, и вспышечно-продуктивные (ВПАО). Стабильные области не производят никаких вспышек за все время их нахождения на диске. Умеренно активные области обычно производят много слабых вспышек и 1–2 мощные вспышки класса М. И наконец ВПАО, которые составляют лишь 5 % от всего количества активных областей (анализ проводился в год максимума солнечной активности), но производят около 95 % всех мощных вспышек с рентгеновским баллом М и Х. Причем

каждая ВПАО обычно генерирует не менее трех вспышек класса М и Х.

Стабильные АО имеют простую стабильную структуру магнитных полей на уровне фотосферы, и монотонные спектры потока интенсивности и поляризации радиоизлучения в микроволновом диапазоне, с максимумом около 4 - 5 см. Поведение этих спектров определяется совместным действием тепловых механизмов (тормозного излучения - *bremsstrahlung* и циклотронного излучения на первых 3 – 4 гармониках гирочастоты) [161]. Циклотронное излучение, приходящее от активной области, имеет круговую поляризацию, соответствующую избытку излучения необыкновенной волны, а знак поляризации определяется полярностью магнитного поля доминирующего пятна.

Пока не обнаружено особых изменений в спектрах умеренно активных областей, что может указывать также на стабильную структуру магнитного поля, изредка нарушаемую слабыми вспышками.

Вспышечно-продуктивные активные области имеют нестабильные и неоднородные спектры поляризованного излучения. Обнаружены следующие новые эффекты в микроволновом излучении на ранней стадии предвспышечной фазы во вспышечно-продуктивных активных областях:

- эффект коротковолновой инверсии знака круговой поляризации в активных областях,
- эффект коротковолнового увеличения потока поляризованного излучения,
- эффект многократной инверсии знака круговой поляризации по частоте и по времени.

По наблюдениям на РАТАН-600 проведено статистическое исследование на регулярных 10-месячных наблюдениях в течение 2001г., которое показало, что более 85% ВПАО имели спектрально-поляризационные эффекты в радиоизлучении на интервалах от нескольких часов до 3-4 суток. Исследованы спектральные и временные характеристики обнаруженных поляризационных эффектов. Эти явления характеризуются широким диапазоном потоков радиоизлучения (0.05-10 с.е.п.), относительно узким диапазоном длин волн (2-5 см), и регистрируются в интервале времени от нескольких часов до нескольких дней перед мощной вспышкой, а также во время вспышки. Предложены некоторые предварительные интерпретации наблюдаемых эффектов. Дальнейшее

изучение обнаруженных проявлений вспышечной плазмы может быть использовано для проверки существующих моделей солнечной вспышки, уточнения сценариев вспышек и будут полезны при разработке новых эффективных критериев прогноза вспышечной активности.

В заключении сформулированы основные результаты диссертации.

Основные результаты работы докладывались на XXVII Радиоастрономической конференции в Санкт-Петербурге, 1997 г.; XIV Конференции молодых европейских радиоастрономов КМЕРА-1998, Пущино; CESRA workshop "Coronal Explosive Events", June 1998, Espoo, Finland, VII Российско-Финском симпозиуме в Санкт-Петербурге, 1999 г; Joint European and National Astronomical Meeting (JENAM) - 2000 в Москве, международной конференции "Солнце в максимуме активности и солнечно-земные аналогии" в Санкт-Петербурге, 2000 г; Всероссийской Астрономической Конференции (БАК) - 2001, Solar Cycle and Space weather (SOLSPA) - 2001 европейской конференции в Италии, международной конференции "Солнечная активность и космические лучи после смены знака полярного магнитного поля Солнца", Санкт - Петербург, 2002, конференции стран СНГ и Прибалтики по активным процессам на Солнце и звездах, С-Петербург, 2002; 10th European Solar Physics Meeting (SPM) "Solar Variability: From Core to Outer Frontiers", в Праге, Чехия, 2002 г, российской конференции памяти А.А. Пистолькорса "Радиотелескопы РТ-2002", и на других конференциях, а также на радиоастрономических и астрофизических семинарах САО и ГАО.

По теме диссертации опубликовано более 20 научных работ, из них 3 в реферируемых журналах.

Глава 1

Реализация метода многоазимутальных наблюдений Солнца на РАТАН-600.

Автоматизация южного сектора РАТАН-600 и перископического отражателя позволила увеличить эффективность солнечных исследований на радиотелескопе и развить метод многоазимутальных наблюдений. В сочетании с многоволновым солнечным приемным комплексом этот метод дает возможность изучать динамические характеристики солнечных структур в широком диапазоне радиоволн и проводить двумерное картографирование Солнца одновременно на многих длинах волн. В настоящее время достигнуто временное разрешение 4 минуты в течение 4 часов при наблюдениях в интервале азимутальных углов от $+30^\circ$ до -30° . В данной главе представлены программно - методические разработки для реализации режима многоазимутальных наблюдений.

1.1 Введение

При исследовании Солнца радиоастрономическими методами перед исследователями стоит задача получения изображения с хорошим пространственным, временным и спектральным разрешением в широком диапазоне, с высокой чувствительностью по потоку излучения и степени поляризации. Существующие на сегодняшний день крупные радиотелескопы (VLA, CCRT, WSRT, OVRO, Nobeyama, РАТАН-600) позволяют исследовать структуру солнечных образований с пространственным разрешением до $3 - 15''$. Каждый из этих инструментов имеет свои ограничения, определяющие его круг задач. РАТАН-600 [107] является

рефлекторной антенной с переменным профилем отражающей поверхности, с большой эффективной площадью (400–600 м² в одном секторе) и рабочим диапазоном от 50 см до 8 мм, что является преимуществом по сравнению с интерферометрическими системами. В сочетании с Панорамным Анализатором Спектра (ПАС) [15] радиотелескоп является уникальным инструментом для солнечных исследований, позволяющим вести параллельный прием в широком диапазоне волн с 5%-ным спектральным разрешением, с высокой чувствительностью по потоку (несколько миллианских) и высокой точностью измерения степени поляризации (доли процента). В то же время главными недостатками РАТАН-600, как инструмента для исследований Солнца, являются относительно низкое временное разрешение и одномерность получаемых изображений. До настоящего времени РАТАН-600 использовался, в основном, для получения одномерных сканов радиоисточников в режиме прохождения. Однако конструкция телескопа позволяет реализовать множество различных режимов наблюдений, включая несколько методов картографирования: азимутальный апертурный синтез двумерных изображений на круговом отражателе и в антенной системе ЮП [107], параллельный околосенитный синтез [108], режим радиогелиографа [39] и др. Здесь мы рассматриваем более детально режим многоазимутальных наблюдений на ЮП.

Наблюдения Солнца проводятся на ЮП с 1976 г. в режиме пассажного инструмента регулярно один раз в день, в местный полдень (около 9:13 UT, или точнее, с учетом уравнения времени, от 8:57 до 9:27 UT). В июле 1982 г. была проведена первая пробная серия наблюдений в диапазоне азимутальных углов $\pm 8^\circ$ от меридиана [14]. При этом были уточнены формулы для расчета высоты установки плоского отражателя и момента прохождения источника через диаграмму радиотелескопа, с учетом рефракции и изменения координат источника в период наблюдений [127]. Был предложен итеративный алгоритм для расчета параметров установки антенны, который используется и в настоящее время. На основе наблюдений, проведенных 19 июля 1982, были построены первые двумерные изображения активной области на Солнце на волне 2 см [101]–[102]. Восстановление одномерных проекций двумерного распределения радиояркости [23] может быть реализовано как в пространстве сигналов, так и в пространстве фурье-спектров. Выбор второго способа в то время был обусловлен возможностями существовавших ЭВМ, точнее, ресурса-

ми их оперативной памяти. Синтезируемый сектор позиционных углов составил $\pm 12^\circ$. Качество полученных карт было невысоким, что затрудняло использование их для астрофизических исследований. Программы были написаны на языке Фортран, и время вычислений на ЭВМ ЕС для построения одной карты составляло ~ 20 минут.

Позднее Ниндос и др. [105] использовали для азимутального картографирования Солнца на РАТАН-600 методику синтеза изображений в пространстве сигналов. Для коррекции изображения была использована, как и в первом случае, стандартная процедура чистки CLEAN (алгоритм Хегбома [58]). Исходным материалом послужили наблюдения в 11 азимутах (от 20° до -20°), выполненные в августе 1985 года. Были построены карты активной области на 4 длинах волн (2.7, 3.2, 4.0, 8.2 см). Программы были написаны на языке Фортран в операционной системе DOS. Количество отсчетов на входных сканах было ограничено 128-ью, с целью сокращения объема используемой оперативной памяти компьютера и времени вычислений.

В последние годы появились новые возможности для проведения чистых и качественных многоазимутальных наблюдений на ЮП благодаря автоматизации плоского отражателя [160] и частичной автоматизации 3-го облучателя [68], на котором был установлен высокоточный привод Movitrac 31C фирмы SEWEURODRIVE, управляемый от компьютера или пульта. Установленный на облучателе солнечный многоволновый комплекс с единым фазовым центром в широком диапазоне радиоволн дает возможность строить одновременные карты на 30 длинах волн в диапазоне от 2 до 15 см.

Кроме того, возросшие возможности вычислительной техники уже не накладывают ограничения на объем вычислений, необходимый для картографирования на ЮП. Основными задачами при современном картографировании на РАТАН-600 становятся повышение качества изображений и удобство пользования программным обеспечением.

С другой стороны, большой объем информации (до 61 (азимутов) $\times$ 36 (длин волн) $= 2196$ сканов Солнца в день) делает актуальной задачу автоматизации процесса обработки и представления данных в виде, удобном для восприятия и анализа.

При проведении многоазимутальных наблюдений, кроме задач по картографированию, важное место занимают задачи по исследованию быстропеременных процессов в солнечной атмосфере.

Начиная с 1999 г. было проведено несколько серий наблюдений во всем диапазоне азимутов (от 30° до -30°), доступных на ЮП, в месяцы, близкие к летнему и зимнему солнцестоянию (июнь-июль, декабрь) и и весеннему и осеннему равноденствию (сентябрь-октябрь, март-апрель). Таблица наблюдений приведена на веб-странице Группы Солнечных Исследований (ГСИ) :http://www.sao.ru/~sun/obs_table.html.

В марте 2002 г. впервые были проведены наблюдения с интервалом между двумя последовательными кульминациями 4 минуты, и интервалом между установками, равным одной минуте. Такая частота регистрации излучения Солнца является практически предельной для наблюдения всего диска в режиме прохождения, с неподвижным облучателем и кареткой, поскольку время прохождения Солнца через ДНА составляет около 2.5 мин, а время установки кругового отражателя с помощью автоматической системы управления (АСУ) в настоящее время составляет около 1 минуты [160].

В принципе, для исследования отдельных локальных источников на Солнце можно повысить временное разрешение до 2 минут между кульминациями, но при этом теряется возможность калибровки по полному потоку, в связи с чем налагаются повышенные требования на стабильность аппаратуры в период наблюдений (до 4 часов). Экспериментальные наблюдения в других режимах, например, слежение в режиме Радио-Шмидт, без переустановок кругового отражателя [68], показали, что эти режимы менее перспективны для РАТАН, так как при этом ухудшаются основные его качества, такие как сочетание высокой чувствительности по плотности потока, пространственной разрешающей способности и координатной точности.

Для обеспечения многоазимутальных наблюдений и обработки данных были внесены необходимые изменения в существующее программное обеспечение (ПО). Кроме того, было разработано новое ПО для решения следующих задач:

- реализация многоволнового азимутального синтеза радиоизображений;
- обеспечение расчета диаграмм направленности для каждой волны;
- обеспечение корректной обработки многоволновых и многоазимутальных данных для изучения динамики солнечных структур;

- реализация возможностей тестовых антенных измерений;
- обеспечение эффективного сопоставления данных РАТАНа с данными других инструментов и спутников с применением языка IDL, который принят в качестве стандарта в международных солнечных наблюдениях;
- другие служебные функции.

В данном разделе описывается ПО, разработанное для этих целей в среде программирования IDL ¹ и на языке C++.

1.2 Методические особенности многоазимутальных наблюдений Солнца в антенной системе "Южный сектор с перископическим отражателем".

Южный сектор кругового отражателя РАТАН-600 образует перископическую систему вместе с плоским зеркалом, состоящим из 124 плоских отражающих элементов размером 3.1×8.5 м, которые могут наклоняться от вертикали до 70° . Протяженность плоского отражателя около 400 м. Он ориентирован точно в направлении восток–запад и отстоит от центра радиотелескопа на 104 м к югу. Между плоским зеркалом и южным сектором главного зеркала радиотелескопа находится круговой рельсовый путь, радиус кривизны которого составляет 160 м. Кабина со вторичным зеркалом (облучатель) может двигаться по этим рельсовым путям, обеспечивая наблюдения в пределах азимутов $\pm 30^\circ$ от юга (рис. 1.1). В системе ЮП в азимутах сохраняется ножевая диаграмма при больших углах места (в режимах наблюдения без плоского отражателя вертикальный

¹IDL (Interactive Data Language, коммерческий продукт, <http://www.rsinc.com/>) является развитой средой для математической обработки данных и их графического представления. Система мультиплатформна, то есть работает как под UNIX/VMS, так и под Windows/Macintosh. Для IDL разработана астрономическая библиотека [85] (<http://idlastro.gsfc.nasa.gov/homepage.html> – поддерживается NASA), которая включает процедуры чтения/записи в формате FITS [151] и специализированная для обработки солнечных данных система SolarSoftWare (SSW), которая прежде всего была предназначена для унификации обработки данных SOHO и YОНКОН [31]. По сравнению с другими, системами для обработки данных, используемыми в астрономии, такими как AIPS (Astronomical Image Processing System – специализирована для обработки интерферометрических данных, н-р VLA и VLBA) и IRAF (Image Reduction and Analysis Facility) IDL более широко используется для обработки солнечных данных. В частности, это основная система для обработки данных Nobeyama и CCRT [71]), что и определило выбор данной системы программирования для картографирования Солнца на РАТАН-600.

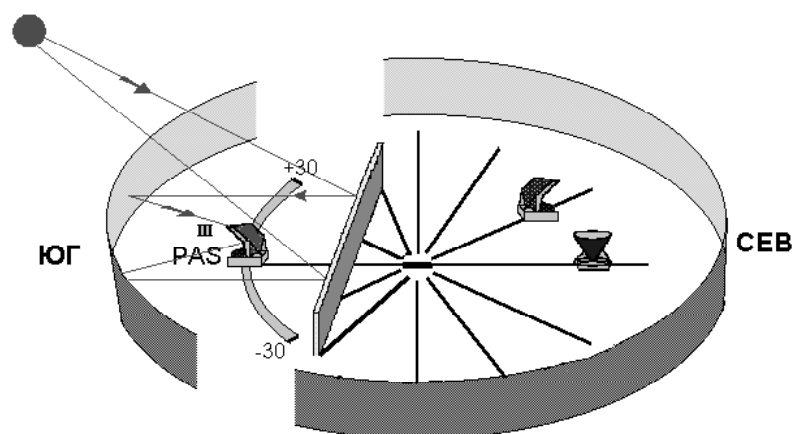


Рис. 1.1: Схема работы РАТАН-600 в режиме южный сектор с плоским отражателем.

размер диаграммы быстро уменьшается при увеличении высоты источника).

Рис. 1.2 иллюстрирует особенности солнечных наблюдений в системе ЮП, связанные с изменением ориентации ножевой диаграммы относительно траектории Солнца [127]. Из рисунка видно, что в периоды, близкие к весеннему и осеннему равноденствию ориентация луча диаграммы относительно оси Солнца сохраняется, что удобно для наблюдения переменных процессов. С другой стороны, в периоды летнего и зимнего солнцестояния значения позиционных углов достигают максимальных значений, что благоприятствует построению двумерных карт стабильных областей на Солнце.

Следует отметить, что метод азимутального картографирования пригоден лишь для изучения стабильных (невспышечных) образований, тогда как многоазимутальные наблюдения с наименьшим временным интервалом необходимы для наблюдений быстропеременных процессов, колебаний солнечной атмосферы и всплесков.

Для взаимной привязки сканов в азимутах следует учитывать изменения параметров антенны (эффективной площади и размера ДНА) в азимутах. Что касается размера ДНА, в первом приближении он должен быть постоянным. Эффективная площадь антенны изменяется пропорционально произведению косинуса угла наклона плоского отражателя от вертикали и косинуса азимута облучателя [127]. На рис. 1.3 приведен график этой зависимости. В периоды равноденствия, когда угол наклона плоского отражателя от вертикали практически не меняется, эффективная площадь уменьшается пропорционально косинусу азимута облуча-

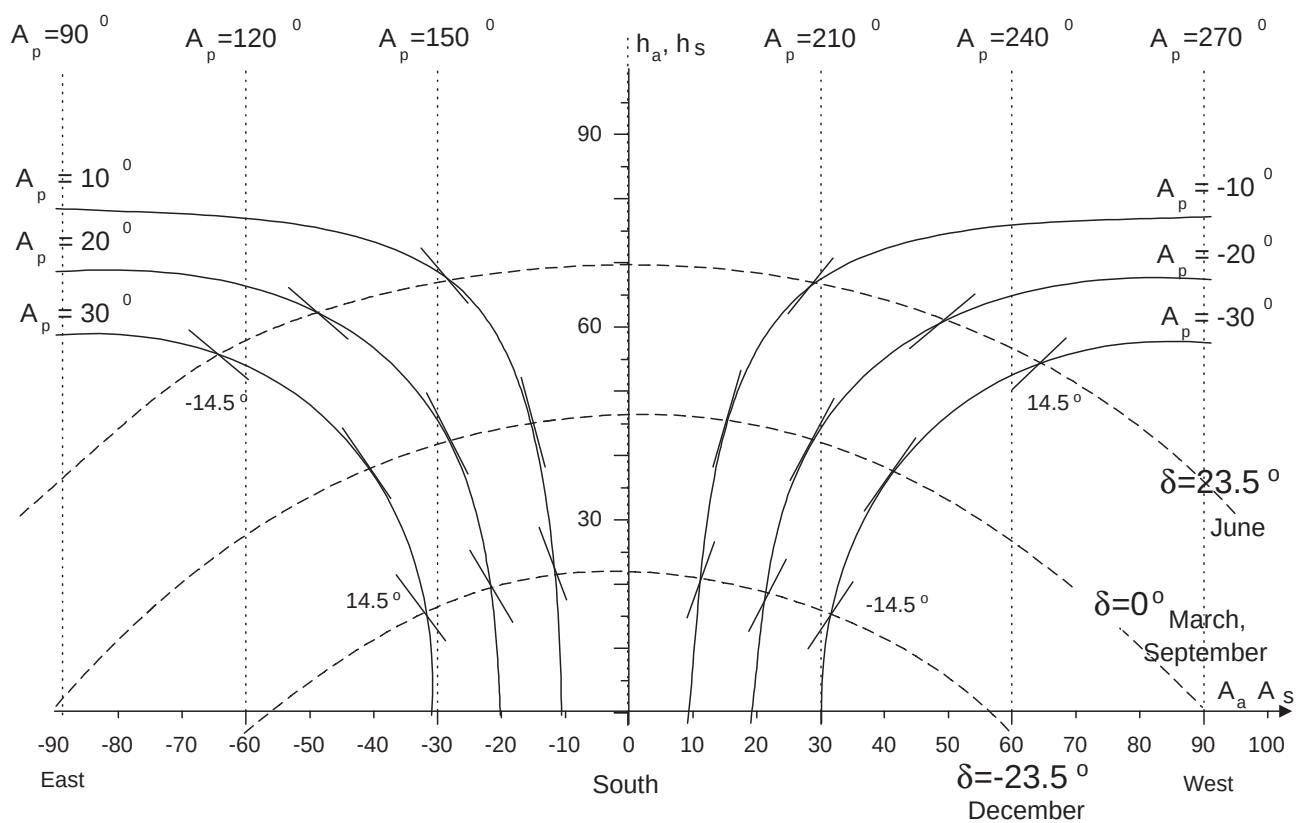


Рис. 1.2: Траектории источника (пунктирные полукруги) и центра луча ДНА (сплошные линии) при различных значениях склонения источника. Показано, что при $\delta = 0^\circ$ ориентация луча ДНА относительно источника не меняется. При значениях склонения $\delta \simeq \pm 23^\circ$ значения позиционных углов меняются в пределах $\pm 14.5^\circ$, при наблюдениях в диапазоне азимутов $\pm 30^\circ$.

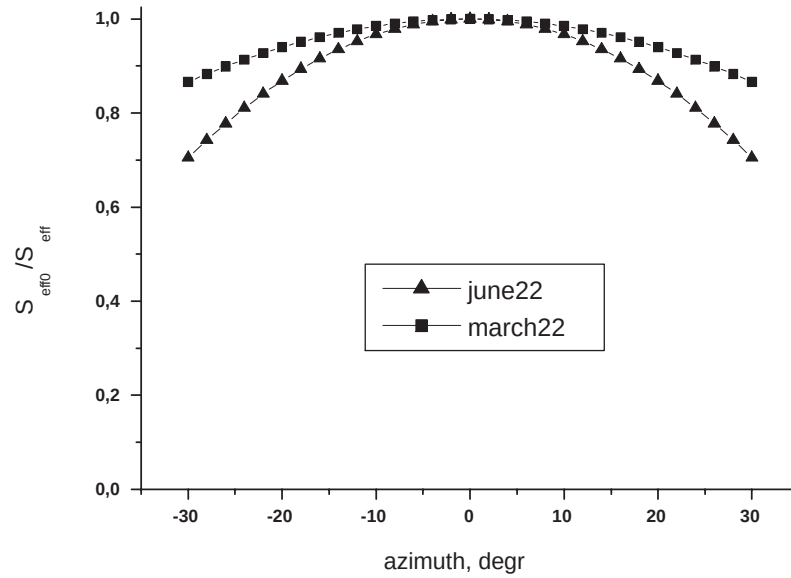


Рис. 1.3: Относительное (по сравнению с меридианом) падение эффективной площади в азимутах. В период равноденствия (22 марта) в крайних азимутах уменьшение площади составляет около 15%, а в период солнцестояния — 30%.

теля и в крайних азимутах падает на 15%. В периоды солнцестояния это падение увеличивается до двух раз. Сказанное особенно справедливо для длинных волн. На коротких волнах косинус высоты плоского отражателя не участвует в уменьшении эффективной площади, поскольку вертикальный размер принимающей поверхности ограничивается вертикальным размером зеркала облучателя (5.5 м). Для солнечных склонений высота облучателя заведомо меньше высоты плоского отражателя (7.4 м), умноженного на косинус высоты. Это приводит к тому, что на коротких волнах работает верхняя кривая, независимо от периода наблюдений (то есть и в равноденствие, и в солнцестояние). Калибровка по полному потоку позволяет осуществлять взаимную привязку азимутов, но на практике наблюдаются некоторые расхождения с расчетными параметрами (рис. 1.4). Наибольшие расхождения имеются в крайних восточных азимутах, от -30° до -26° . Здесь падение антенной температуры по сравнению с меридианом составляет до 30% в равноденствие, вместо ожидаемых 15%. В остальных азимутах расхождение составляет не более 5%.

Причины этой и других ошибок бывает трудно выявить из-за сложно-

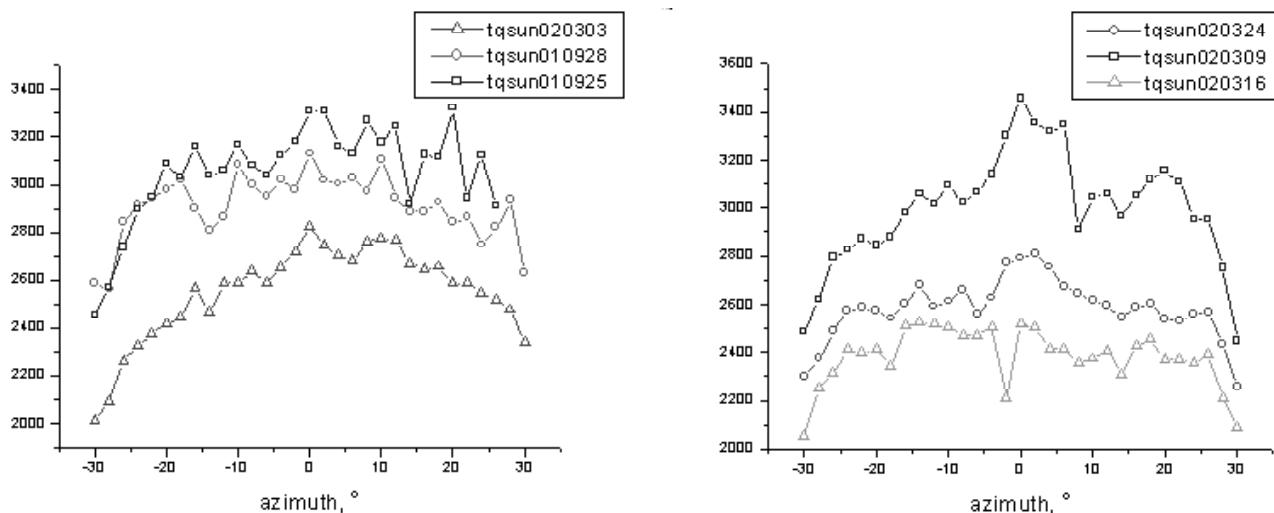


Рис. 1.4: Изменение антенной температуры спокойного Солнца в азимутах на волне 3.21 см: слева) при установках с сокращенной апертурой (109 щитов); справа) при установках с полной апертурой (166 щитов).

сти используемой трехзеркальной антенной системы. Некоторые ошибки (например, в расчетах времени кульминации и метках для установки облучателя в азимут) были выявлены при наблюдениях и минимизированы, а другие (например, вынос ДНА по высоте) рекомендуется учитывать при обработке. Ниже описываются основные виды ошибок, влияющих на качество наблюдений, и методики их определения по наблюдениям Солнца. Все ошибки можно разбить на две основные группы: 1) ошибки установки антенной системы по азимуту, 2) ошибки наведения антенной системы по высоте.

Первая группа складывается из ошибок наведения кругового отражателя, ошибок установки плоского отражателя и ошибок установки облучателя в данный азимут. Точность установки кругового отражателя определяется, прежде всего, точным определением мест нулей отражающих элементов и точностью юстировки отражающей поверхности. К такого рода ошибкам особенно чувствительны короткие волны. В период наблюдений геодезическая юстировка была проведена только для 125-ти отражательных элементов из 166, которые участвуют в центральной установке. В наблюдениях в азимутах участвовало всего 225 щитов южного сектора. Не участвовали в наблюдениях 92 элемента соседних секторов, прилегающих к южному, которые входят в расчетную установку. Из них 30 элементов планируется ввести в действие к будущим

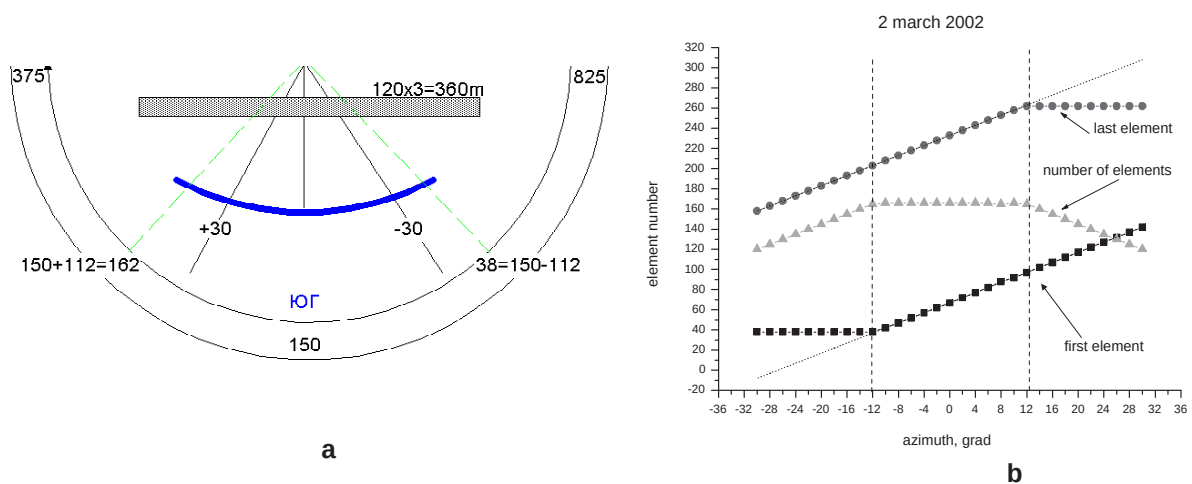


Рис. 1.5: а): схема расположения элементов южного сектора. б): номера и количество отражательных элементов кругового зеркала, участвующих в азимутальных установках. Здесь показаны номера первого и последнего щитов, участвующих в реальных азимутальных установках (верхняя и нижняя линии), и общее количество щитов в каждой установке (средняя линия). В крайних азимутах (начиная с $\pm 14^\circ$) остаются неустановленными от 5 до 45 элементов западного сектора и столько же восточного (показано пунктирными линиями), что составляет 28% от общего количества щитов, которые должны участвовать в каждой установке.

сериям многоазимутальных наблюдений, что увеличит число щитов в крайних азимутах на 13%, сдвинув границу азимутов с полной апертурой с 12° до 18° (см. рис. 1.5).

Выпадение из установки крайних щитов, кроме уширения диаграммы, также приводит к уменьшению эффективной площади антенны. Для протяженного источника, которым является спокойное Солнце, это влияние малозаметно. Для точечных источников уменьшение сигнала может быть значительным (пропорционально квадрату количества невыставленных щитов). Однако из-за косинусоидального распределения мощности в раскрыве вторичного зеркала (облучателя), и такого же распределения в раскрыве совмещенного облучателя в фокусе вторичного зеркала, эффективно облучаемое количество щитов меньше, и влияние неустановки крайних щитов относительно мало.

Ошибки установки плоского отражателя сказываются на качестве наблюдений минимальным образом. Обнаруженный (лабораторией антенных юстировок) разворот всего плоского отражателя по азимуту, приводивший к образованию бокового лепестка диаграммы, уменьшен

до приемлемых значений.

Ошибки установки облучателя в данный азимут наиболее явно видны в данных наблюдений, поэтому их легко выделить и контролировать. Перестановки облучателя в настоящее время осуществляются управлением от пульта при участии операторов. Пробные наблюдения в режиме автоматического управления от компьютера показали, что расстояние, проходимое облучателем по рельсам, соответствует ожидаемому угловому перемещению с точностью около 0.01%, что дает ошибку до 1.5 см при перемещении между установками. Для исключения систематических ошибок была составлена карта мест реперов на дуговых рельсовых путях, которая представляет собой таблицу расстояний между азимутами в инкрементах привода. Эта таблица используется программой управления приводом, которая была написана для реализации автоматических перестановок облучателя при многоазимутальных наблюдениях. Однако шумы, связанные с люфтами, не позволили реализовать необходимую точность установки для наблюдений на коротких волнах. Поэтому возможности точного цифрового привода в настоящее время полностью не используются, нужна более сложная система управления, с обратной связью (информация, связанная с управлением приводом от компьютера, и местами реперов, приведена на веб-странице ГСИ <http://www.sao.ru/~sun>, в Справочнике по наблюдениям Солнца на РАТАН-600, далее см. Инструкцию для наблюдателя на облучателе #3).

Другой источник ошибок заключается в температурных изменениях положений реперов, которые могут доходить до значений больше 1 см. Более стабильные выносные репера пока установлены только через каждые 4°. Планируется их установка через каждые 2°, что должно улучшить точность установки облучателя. Далее следуют ошибки горизонтирования вторичного зеркала. При наблюдениях с интервалом между азимутальными наблюдениями 1 мин не хватает времени для горизонтирования с участием операторов. Для таких наблюдений необходимо применять автоматическое горизонтирование (такая система реализована на 1-ом облучателе).

Таким образом, совокупность ошибок установки облучателя в азимут, расчета времени кульминации, наведения кругового и плоского отражателя по азимуту могут приводить к абберациям, а также к тому, что расчетное время кульминации может не совпадать с моментом про-

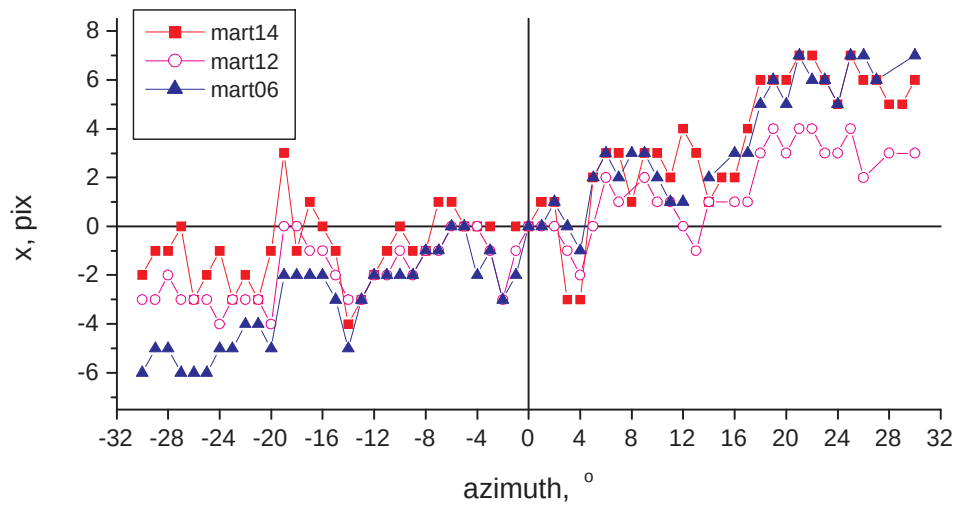


Рис. 1.6: График смещения максимума локального источника на Солнце относительно положения в меридиане. По вертикальной оси отложено количество отсчетов. 1 отсчет равен примерно 5 секундам дуги на небе. На графике приведены данные за три дня — 6, 12 и 14 марта 2002 г. Наклон кривых обусловлен смещением источников за счет вращения Солнца. Величина отклонений от наклонной прямой определяется действием ошибок установки облучателя в фокус и ошибок фокусировки и наведения антенны.

хождения центра Солнца на скане. На рис. 1.6 приведены результаты измерения совокупной ошибки наведения по азимуту, по смещению максимума локального источника от положения в меридиане после коррекции положения реперов.

Если предположить, что ошибка обусловлена точностью установки облучателя в азимут, то среднеквадратичное отклонение составляет, в переводе на расстояние по рельсам, около 3 мм. Ошибки такой величины не приводят к заметным абберациям. Для восстановления центра источника в программе WorkScan [52] обычно используется процедура выравнивания по краям скана. Если на краях Солнца есть источники, этот метод работает неточно. В разработанном нами ПО в этом случае используется выравнивание по максимуму сигнала от стабильного локального источника на Солнце (утилита `az_centr.pro`).

Что касается ошибок наведения антенны по высоте, то они меньше влияют на качество наблюдений, поскольку размер ДНА в большей части рабочего диапазона длин волн больше размера Солнца. Но величину этих ошибок также следует измерять и учитывать ее при вычислении

потоков от локальных источников на коротких волнах. Использование методики, описанной в разделе 7, показало, что существует систематический вынос ДНА по высоте около $-(4-6)$ минут дуги на всех волнах и всех азимутах. К такого рода ошибкам может приводить, например, недостаточно точный счет эфемерид (например, из-за неточного учета рефракции), или неточное определение мест нулей отражательных элементов. Для выяснения причины выноса ДНА необходимо провести наблюдения калибровочных источников в азимутах. Для более точных вычислений потоков от ЛИ (особенно в азимутах) на коротких волнах (меньше 4 см) необходимо учитывать, что за время прохождения диска Солнца через ДНА (2.5 мин) высота Солнца изменяется. В утренних азимутах она увеличивается, а в послеобеденных уменьшается, проходя вблизи моментов солнцестояния около 10 угловых минут по высоте за время одного наблюдения. Из-за этого ДНА пересекает Солнце не по прямой, а по некоторой кривой, в направлении NW-SE утром и SW-NE после полудня. Позиционный угол $q = -\arcsin(\tan A \tan \delta)$ летом увеличивает этот наклон, а зимой уменьшает на величину до $h_1 = r \cdot \sin(q) = 16 \cdot \sin 14.5 = 4$ угловых минут.

Для наблюдений с высоким временным разрешением число отражательных элементов было уменьшено с 166 до 109, что уменьшило влияние диаграммных ошибок и уменьшило время наведения антенны. Измерения размеров точечного источника на Солнце показали, что размеры ДНА сохраняются в большом интервале азимутальных углов и лишь в крайних азимутах (от -26° до -30°) она заметно уширяется по сравнению с меридианом. Для задач картографирования рекомендуется эти азимуты пока не использовать, до улучшения качества этих наблюдений с помощью юстировок и включения в наблюдение элементов смежных секторов.

1.3 Описание программы RAIS (RATAN-600 Azimuthal Image Synthesis)

1.3.1 Основные концепции

Нами создан новый пакет программ для азимутального картографирования, который мы старались освободить от ряда принципиальных ограничений, имевшихся в предыдущих версиях, и сделать максимально

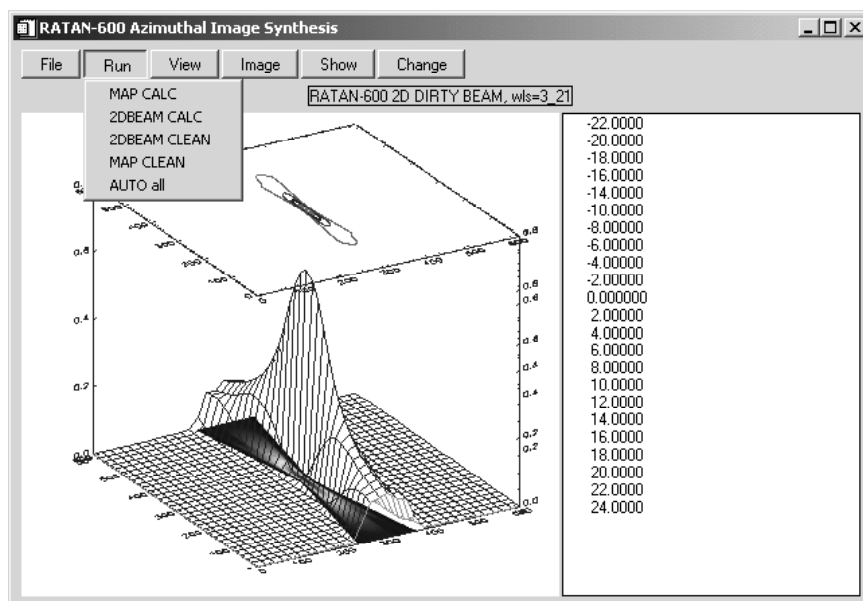


Рис. 1.7: Общий вид главного окна программы RAIS. В окне для рисования (слева) отображена синтезированная ДНА на волне 3.21 см. В окне для вывода текстовой информации (справа) выведен список используемых азимутальных углов.

удобным для пользователя. Автор придерживался следующих основных концепций, которые отличают данное ПО:

- автоматизация всех этапов вычислений, включая наличие пакетного режима работы;
- удобство для пользователя (наличие дружественного графического интерфейса);
- универсальность (отсутствие ограничений, например, на тип объекта, поддержка общепринятых форматов и т.п.);
- открытость для развития программы (возможность добавления новых процедур без значительных изменений в основной программе);
- возможность экспериментирования и проведения модельных вычислений.

Ниже перечисляются свойства программного пакета, за счет которых реализованы указанные выше концепции.

- Интеграция пакета со стандартной программой обработки WorkScan для солнечных данных РАТАН-600. Предварительная обработка

данных, включая калибровку, вычитание спокойного Солнца, сглаживание и другие стандартные процедуры, проводятся в программе WorkScan.

- Программа имеет удобный графический интерфейс (GUI — graphical user interface) и организована в форме IDL widget (рис 1.7).
- Использование FITS-формата для записи входных и выходных файлов. Для входных файлов обязательны некоторые поля (см. ниже), создаваемые программой WorkScan.
- Возможность картографирования не только Солнца, но и других объектов (например, Луны, Крабовидной туманности), для которых есть набор сканов под разными позиционными углами.
- Отсутствие ограничений на количество точек, на количество сканов или длин волн. Пользователь выбирает только каталог с данными и длину волны. Остальные параметры и эфемериды считываются из FITS-заголовка файла данных или вычисляются автоматически.
- Диаграмма направленности вводится в любом масштабе по оси x . Программа автоматически приводит ее к масштабу скана. Нет необходимости специально вычислять диаграмму с тем же шагом, что и сканы. В отдельном каталоге находится банк данных по диаграммам на всех длинах волн, на которых производится регистрация.
- Возможность построения карт не только из сканов, полученных на ЮП, но и по данным, полученным в других режимах наблюдений, например, в режиме эстафеты с зонированием [48] на северном (а также западном и восточном) секторе (далее СЕВ). Последняя методика осуществлена на РАТАНе впервые [45].
- Автоматическое сохранение в FITS-формате ряда промежуточных результатов (например, “грязная карта”, “грязная” диаграмма), что дает возможность остановить вычисления на любом этапе, а затем продолжить в другое время.
- Возможность записи в графическом формате (GIF, PS) полученных на экране изображений.

- Поскольку качество получаемых карт зависит от правильного подбора параметров чистки и соответствия расчетных диаграмм реальным, в программе можно экспериментировать, подбирая параметры (меню Change).
- Возможность работы в пакетном режиме, без визуализации выполняемых процессов, с построением карт на всех волнах, для которых в указанном каталоге существуют заголовочные файлы с именами типа 9_35GHz.0hd (например, подкаталоги OBS во вторичном архиве ²).

1.3.2 Методика использования программы RAIS

Синтез двумерного распределения яркости по одномерным профилям, полученным при сканировании объекта ножевыми лучами, математически осуществляется довольно просто. В основе процедуры построения синтезированного изображения лежит алгоритм суммирования соответствующих значений одномерных профилей [1]:

$$g(x, y) = \sum g_{qi}(x \cos q_i + y \sin q_i). \quad (1.1)$$

Полученная “грязная” карта (ГК) $g(x, y)$ эквивалентна свертке исходного объекта $f(x, y)$ с синтезированной диаграммой h :

$$g(x_0, y_0) = \int \int h(x - x_0, y - y_0) f(x, y) dx dy + n(x_0, y_0), \quad (1.2)$$

где $n(x_0, y_0)$ — случайный шум.

Восстановление f в математическом смысле является задачей обращения линейного уравнения Фредгольма первого рода типа свертки. Эта задача в данном случае решается с помощью алгоритма CLEAN.

Соответственно, процесс построения карты состоит из четырех основных процедур-команд (рис. 1.7):

- синтезирование “грязной” карты (команда MAP CALC),
- построение “грязной” синтезированной диаграммы (2D BEAM CALC),

²Независимо от первичного архива данных РАТАН-600 [70] в ГСИ поддерживается вторичный архив обработанных данных TREATMENT. В этом архиве хранятся данные двух уровней обработки: 1) данные, преобразованные из исходного формата в формат FITS, с коррекцией за переключения усиления, хранятся в каталогах YYYY/YMMM/MMDD, и 2) те же данные, обработанные пакетным файлом prim.pkf и процедурой az-ghz.pro с разбивкой данных по частотам, — в подкаталогах OUT.

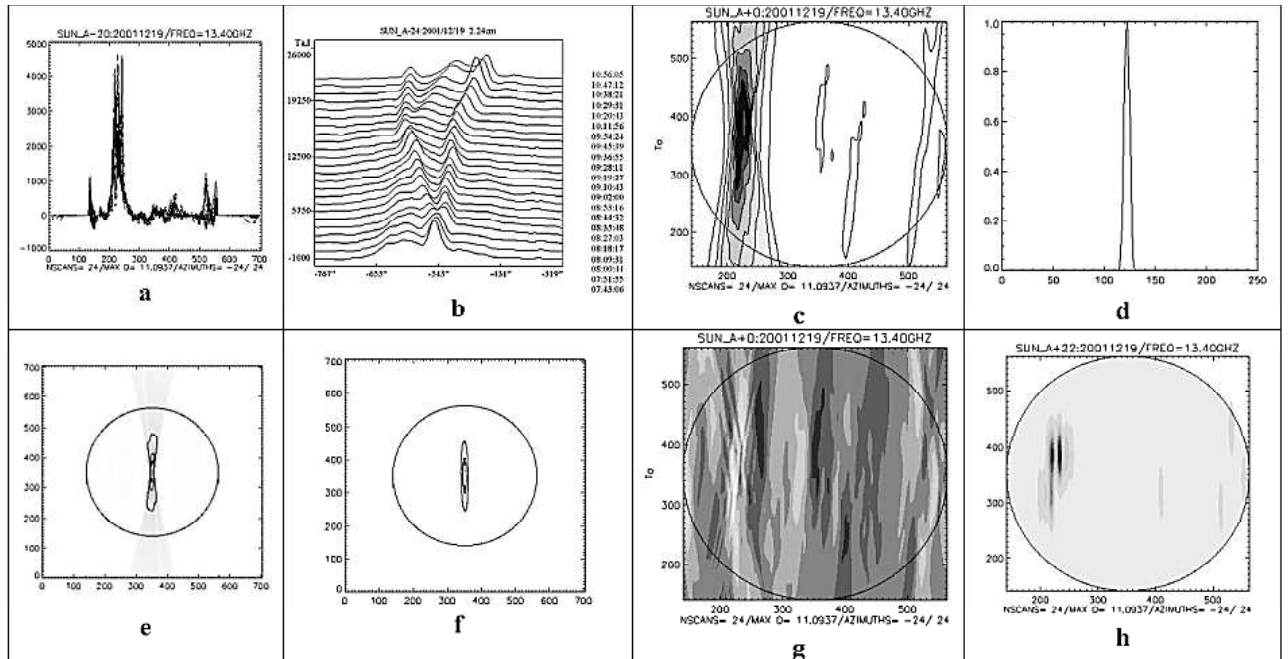


Рис. 1.8: Визуализация этапов картографирования: а,б) одномерные сканы всего диска и отдельной активной области; в) “грязная” 2D-карта; д) одномерная ДНА для ЮП; е) синтезированная 2D ДНА; ф) чистая 2D ДНА; г) остатки от вычитания источников из “грязной” карты (residuals). Стандартное отклонение составляет 1.5 % от максимума исходной карты. h) чистая 2D-карта Солнца.

- вычисление “чистой” двумерной диаграммы (2D BEAM CLEAN),
- чистка “грязной” карты (MAP CLEAN).

Для начала работы нужно открыть HD-файл с многоазимутальными данными на одной частоте (Меню File->Open Ghz file...).

Для построения карт на всех волнах в пакетном режиме следует открыть каталог со сканами (Меню File->Open Ghzs dir +autorun).

Если загружены данные на одной волне, можно запустить автоматическое выполнение всех 4 процедур командой меню Run-> Auto-all. Если какие-то процедуры уже выполнены и имеются сохраненные на диске FITS-файлы (например, с ГК), можно запускать следующие процедуры. Так, если проведена чистка с одним значением усиления и результат не устраивает, нужно поменять усиление и запустить MAP CLEAN заново. Или поэкспериментировать, меняя размер ДНА и уровень, на котором в него вписывается двумерная гауссиана.

Команды меню VIEW позволяют показать результаты вычислений — одномерные и двумерные диаграммы и карты, с помощью разных способов отображения — в виде контурных, цветных, черно-белых карт, наложения контурных карт на цветные изображения и т.д.

Можно также просмотреть точки, в которых диаграмма вычиталась из “грязной” карты, и остатки от вычитания (residuals). Пользователь может выбрать “чистую” карту с добавленными остатками или без них.

Команды меню SHOW показывают различные параметры сканов — набор позиционных углов, азимутов, времен, склонений и т.п.

Команды меню CHANGE предназначены для изменения параметров чистки, размеров диаграмм и т.д.

Все выполняемые программой процессы отображаются в графическом окне: добавление каждого сечения в ГК, вписывание двумерной гауссианы в ядро ГД, вычитание ГД из максимумов, места этих максимумов и др. (рис. 1.8).

На рис. 1.8а показаны одномерные сканы полного диска Солнца на волне 2.24 см для 19 декабря 2001 г. На следующем рис. 1.8b в большем масштабе по горизонтали представлена активная область в восточном полушарии, сканированная под разными позиционными углами. Видно, что источник, сигнал которого в первом азимуте состоит из одного пика и протяженного фона, к последнему азимуту постепенно разрешается на три источника примерно одинаковой яркости. Полученная ГК представлена на рис.1.8с. Из-за того, что синтезированная диаграмма имеет боковые лепестки (см. рис.1.8d), источники также получают с подобными лепестками, т.е. “грязные”. Алгоритм чистки лепестков процедурой CLEAN состоит в том, что программа находит места максимумов, вычитает из них “грязную” диаграмму и добавляет (с заданным усилением) “чистую” диаграмму. “Грязная” двумерная диаграмма (ГД) вычисляется таким же способом, что и “грязная” карта, но вместо сканов суммируется одномерная диаграмма, поворачиваемая под теми же углами. “Чистая” двумерная диаграмма (ЧД) получается путем вписывания двумерной гауссианы в ядро “грязной” диаграммы (рис. 1.8f). На волне 3.21 см размер синтезированной диаграммы составляет $20'' \times 155''$. Вертикальный размер ЧД будет тем меньше, чем больше сектор позиционных углов. Для ЮП этот сектор ограничивается геометрией системы, поскольку при угле раскрытия рельсовых путей от $+30$ до -30° максимальный сектор позиционных углов составляет около $\pm 14.5^\circ$. Таким

образом, вместо ножевой диаграммы мы получаем ограниченный размер по двум координатам, но при этом источники вытянуты по вертикали. Что касается углового разрешения между сканами, для точного восстановления двумерного распределения радиояркости Солнца необходимо иметь $N \geq \frac{\pi D}{\Delta\phi} = 150$ сечений через равные угловые промежутки [23]. Поскольку в нашем случае сектор составляет 30° , вместо 180° при полном заполнении uv-плоскости, для картографирования достаточно использовать 25 сканов между азимутами $+30^\circ$ и -30° , а при наблюдениях в азимутах от $+20^\circ$ до -20° достаточно 18 сканов. Наблюдения через 2° по азимуту обеспечивают именно такое количество сканов.

При наблюдениях на в режиме эстафеты сектор возможных позиционных углов больше, чем на ЮП, но горизонтальный размер диаграммы также значительно увеличивается, из-за меньшего раскрытия апертуры (в наблюдениях участвует около 55 щитов, что в три раза меньше, чем в обычных установках на ЮП). Поэтому синтезированные источники в этом режиме получаются более симметричными.

Подбор параметров чистки — усиления и уровня шума — зависит от структуры объекта, и осуществляется пользователем субъективно, на основе априорной информации. Большие значения усиления сокращают счетное время, но приводят к искажению изображения — дроблению на отдельные сильные компоненты. При слишком малых значениях усиления количество итераций увеличивается, но при этом происходит накопление арифметических ошибок. В общем случае можно рекомендовать на более коротких волнах использовать меньшие значения усиления (0.3–0.5), а на более длинных волнах — большие значения (0.5–0.7). Правильный выбор параметров чистки важен, но количество итераций в нашем случае всегда остается в пределах 100, тогда как для систем с высоким двумерным разрешением (VLA, Nobeyama) количество итераций превышает 1000. Поэтому улучшение качества карт зависит в большей степени от качества исходных сканов и их правильной взаимной привязки. Применение процедуры восстановления центра Солнца на записи по компактному источнику (а не по производной на краях) одновременно осуществляет коррекцию положения источников за счет вращения Солнца. В этом случае, чтобы отключить повторный сдвиг сканов на расчетные значения смещения, надо установить значение `Change-> rotation correct = 1`. Если же используются сканы, центрированные по производной на краях Солнца (Луны), этот флаг должен быть устано-

влен равным нулю. При этом надо иметь в виду, что разные точки на скане, в зависимости от удаленности от меридиана, смещаются за 4 часа наблюдений на разное расстояние. Поскольку для коррекции используется единый сдвиг, то эта процедура также дает мелкие ошибки. Для уменьшения такого рода ошибок целесообразнее картографировать не все Солнце целиком, а отдельные активные области. Источники вблизи меридиана восстанавливаются лучше, чем источники на лимбе Солнца.

Следующим фактором, влияющим на качество синтезированных двумерных изображений, являются ошибки при вычитании спокойного Солнца. Использование для этой цели метода вписывания шаблона спокойного Солнца (диск равномерной яркости, свернутый с диаграммой РАТАН-600) в этом случае малоэффективно, потому что такая процедура дает большие источники на краях. Особенно этот эффект существен в годы максимума активности, поскольку возрастание экваториальной активности приводит к отличию формы Солнца от формы круглого диска. Для того, чтобы выделить активные области в пределах диска Солнца, лучше применять шаблон, который можно создать путем сглаживания кубическими сплайнами (указав 10–15 точек на диске в функции Scan->Smooth->Cube Spline) и медианного сглаживания в программе WorkScan. Другой метод заключается в загрузке нескольких сканов на одной и той же волне за 5–10 близких дней и выделении нижней огибающей (меню Transform->Group scan min).

1.3.3 Входные данные

Для работы с пакетом программ для азимутального картографирования данные наблюдений должны быть предварительно обработаны программой Workscan.

Предварительная обработка данных

Предварительная обработка в WorkScan включает следующие процедуры.

1. Калибровка сканов. Для калибровки по полному потоку используются данные с поляриметров Нобеяма (<ftp://solar.nro.nao.ac.jp/pub/norp/data/daily/>). Чтобы работала функция меню CalibrFullFlux, в подкаталоге sunflux каталога WorkScan

должны быть существовать файлы с потоками на соответствующую дату. Если эти файлы отсутствуют, их необходимо создать, скачав необходимые данные с web-страницы <http://www.sao.ru/~sun>, или преобразовать в нужный формат данные со станции Нобейма. Начиная с 2002-го года, эти данные стали доступны в Интернете в конце каждого месяца (раньше данные были доступны только в конце года).

2. Сглаживание. Рекомендуется выполнять операцию сглаживания (медианное или гауссовое) по количеству точек, соответствующему 0.3 размера диаграммы (вводить значение -0.3)
3. Восстановление положения центра диска Солнца. Производится в случае, если произошел сбой времени, или если в расчете времени кульминаций в азимутах была ошибка. В последнем случае положение центра Солнца можно восстановить по его краям, при отсутствии источников на лимбе.
4. Вычитание уровня спокойного Солнца. Перед этой процедурой рекомендуется занести нужную волну на всех азимутах в отдельный каталог, создать для этого набора header-файл (можно вручную, можно утилитой ChoosedScan из пакета программ WorkScan). Затем загрузить эту волну обратно в WorkScan и проверить совпадение центра и уровня спокойного Солнца на всех сканах. После этого провести операцию вычитания уровня спокойного Солнца.

После этого следует сгруппировать данные по частотам с помощью процедуры `az-ghz.pro` в IDL, и затем вычесть спокойное Солнце.

Формат данных

Программа RAIS считывает входные сканы в формате HD. Данный формат представляет собой набор файлов в FITS-формате, каждый из которых содержит скан в отдельном азимуте и отдельной длине волны, и заголовочного файла, в котором перечислены названия этих FITS-файлов. Файлы могут быть сгруппированы по частоте, дате или азимуту. Такая группировка выполнена во вторичном архиве. Перегруппировка также может быть произведена утилитой Choosed Scan из пакета WorkScan.

FITS-шапка сканов должна содержать следующие необходимые поля:

Пункты 1–3 можно также выполнить в WorkScan с помощью пакетного файла prim.pkf следующего содержания:

[Init]	file1.wsf	ViewDataI=1
AppHide=0	file2.fit	ViewDataV=1
AppExit=0	file3.0hd	FindScanGreatGHz=13.400
OutFile=MyLog.txt	[Commands]	CalcCenterVscan=1
OutPrefix=	ViewWorkI=1	CopyWorkSheetToData
FileMask=obs*.*hd	ViewWorkV=1	FindScanGreatGHz=4
InDir=d:\011221_1	FlagAllScan=0	CalibrFullFlux
OutDir=d:\011221_1\out	FlagAllScan=1	SaveWorkSheet=0 0
[Files]	IVtoRL=1	

Рекомендуется исключать из процедуры картографирования частоты меньше 3 ГГц, поскольку на этих частотах вертикальный размер синтезированной ДНА больше диска Солнца. Для удаления частот нужно добавить в пакетный файл строки типа:

FindScanGHz=01.015

+ScanDelete

на каждую удаляемую волну.

NAXIS1 = 710 / LENGTH OF DATA AXIS 1

NAXIS2 = 2 / LENGTH OF DATA AXIS 2

PMCSUN = 347.50 / POST MERIDIUM CENTER

DATE-OBS= '2001/12/19' /

TIME-OBS= '09:28:11.100' / UT

OBJECT = 'SUN_A-4' /

RADIUS = 976 / OPTICAL SOLAR RADIUS (ARCSECOND)

AZIMUTH = 0.000000000 / Azimuth of observ.

ALTITUDE= 22.796167374 / Altitude of source

ANGLE = 8.170000076 / Angle of decl.

CDELTA1 = 4.6205 / ARCSEC

OBS-FREQ= 7.830 / GHz

THETA-DG= 27.91 / DIMENSION OF DIAGRAMM (ARCSECOND)

TQSUN = 6226 / Ta[K]

FLUX_L = 0.127 / KOEF. Ta[K] →Intensity[Jy/arc.sec.]

BSCALE1 = 2.807371e-01 /

BZERO1 = 8.374995e+03 /

BSCALE2 = 5.457768e-02 /

BZERO2 = -1.066118e+03 /

Данные должны быть записаны в виде параметров Стокса I,V. Тип данных должен быть I2 (BITPIX 16) binary или I8 (BITPIX 64) ASCII

text. После выбора header файла необходимо указать параметр картографирования — интенсивность или поляризацию (переменная `i_v`). По умолчанию программа работает с параметром `I`.

Для штатных наблюдений на северном секторе значения азимутов наблюдений считываются из поля OBJECT. Тип наблюдений также определяется значением этого поля. В настоящее время поддерживается обработка двух типов наблюдений — south (наблюдения на ЮП) и north (наблюдения в режиме эстафеты, СЕВ). Если поле OBJECT начинается с больших букв SUN, то данные считаются типа south, если маленькими буквами sun — то типа north. Для расчета позиционного угла q , под которыми ДНА сканирует объект, необходимо знать эфемериды, т.е. азимут и склонение источника. Для наблюдений СЕВ значение позиционного угла вычисляется предварительно в программе Geltows.exe, которая преобразует данные из формата регистрации в формат WorkScan, по формуле: $q = \frac{\arcsin(\cos \phi)}{\cos \delta \cdot \sin A}$, и вписывается в поле ANGLE. Это поле изначально предназначалось в программе WorkScan для хранения позиционного угла P , под которым центральный солнечный меридиан наклонен от вертикали в картинной плоскости. Для ЮП это поле заполняется углом P , а угол q вычисляется при картографировании по формуле:

$q = -\arcsin(\tan A \tan \delta)$, где A — азимут вершины параболы, δ — склонение источника.

При регистрации на ЮП в настоящее время в заголовок файла данных из эфемерид Солнца записываются только высота в меридиане, время прохождения в данном азимуте и позиционный угол P . При картографировании также необходимо знать склонение источника в каждом азимуте. Однако его значение в период прохождения через все используемые азимуты меняется незначительно (сотые доли процента), и в первом приближении можно использовать для всех азимутов значение склонения в меридиане. Поэтому мы пока не стали изменять формат заголовка данных для включения в него поля склонения. Для наблюдений в азимутах в программу регистрации [124] и программы обработки ([123], [52]) введены необходимые изменения. В частности, в программе регистрации устранена ошибка, приводившая к частому сбою времени при загрузке следующего задания. В программе WorkScan увеличено количество одновременно загружаемых сканов с 60 до 100. Изменена схема формирования имен файлов, поскольку старая позволяла именовать только 40 наблюдений с одинаковой датой.

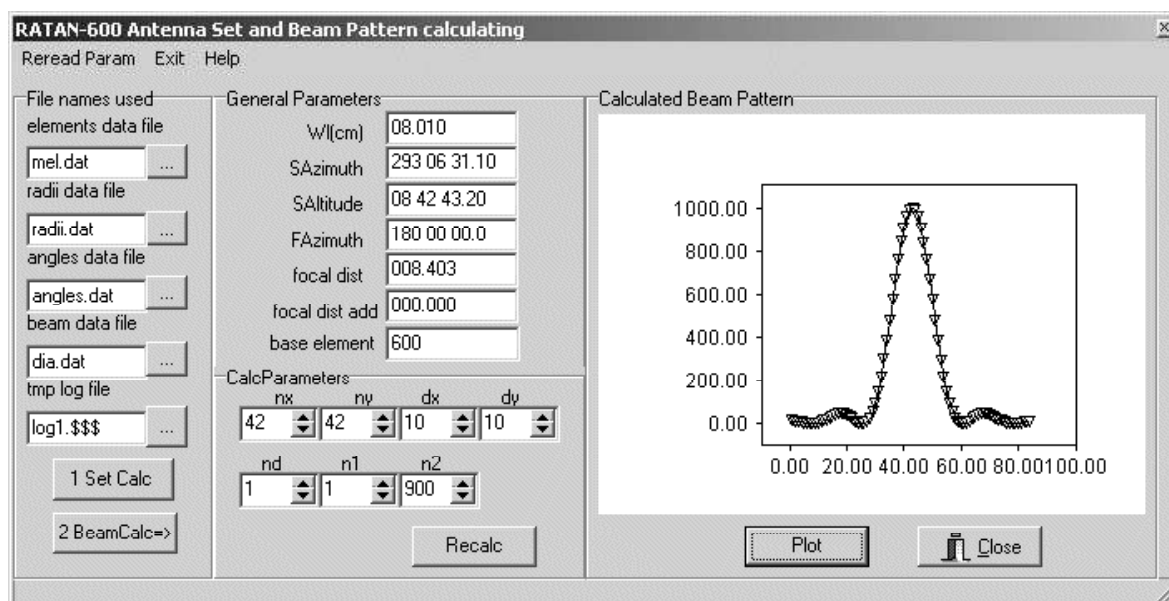


Рис. 1.9: Общий вид окна программы расчета ДНА РТАН-600 Beamsu.

1.3.4 Расчет одномерных диаграмм направленности антенны

Программа расчета ДНА для северного сектора РТАН-600

Для расчета диаграмм направленности антенны (ДНА) при наблюдениях на северном секторе используется программа Beamsu. Программа написана на C++ Builder в ОС Windows и имеет оконный интерфейс, в котором можно редактировать входные параметры и просматривать одномерные сечения рассчитанных диаграмм (рис. 1.9). В программе реализован алгоритм, разработанный Гельфрейхом ([36],[37]). Для начала работы нужно в каталоге, в котором находится программа, создать входной файл с именем input.dat, содержащий две строки в формате:

```
wl ag am as hg hm hs afg afm afs f nd n1 n2 nx ny dx dy dnn drnn df
8.01 293 6 31.1 8 42 43.2 180 0 0.0 8.403 1 1 900 42 42 10.0 10.0 600 0.0
0.0
```

Первая строка описывает имена переменных и является комментарием. Во вторую нужно записать значения этих переменных. Здесь:

wl — длина волны,

ag, am, as — градусы, минуты, секунды дуги азимута источника,

hg, hm, hs — градусы, минуты, секунды дуги высоты источника над горизонтом,

afg, afm, afs — градусы, минуты, секунды дуги азимута фокальной точки,

f — расстояние фокальной точки до центра антенны в горизонтальной плоскости в метрах,
 nd — шаг вычисления диаграммы,
 $n1, n2$ — номера первого и последнего щитов в синфазной установке,
 nx, ny — количество точек по осям,
 dx, dy — размер ячеек сетки,
 dnn — номер опорного щита,
 $drnn$ — добавка к радиусу опорного щита,
 df — сдвиг частоты.

Изменение расстояний между числами не имеет особого значения, однако важно не перепутать форматы чисел (целые с вещественными). При первом запуске программа считывает параметры из файла, далее их можно редактировать в окне программы.

Для расчета двумерной ДНА надо последовательно нажать кнопки 1Set Calc и 2Beam Calc. При нажатии на первую кнопку происходит расчет уставок антенны. Результаты записываются в файлы, имена которых задаются в группе параметров File names used. По умолчанию даются имена mel.dat (таблица с флагами установки элементов кругового отражателя: если 1, щит участвует в установке), radii.dat (радиусы установки щитов), angles.dat (азимутальные углы). При нажатии на вторую кнопку создается файл dia.dat с двумерной диаграммой. Между этими двумя шагами при необходимости можно изменить значения переменных в группе General parameters и пересчитать диаграмму, нажав кнопку Recalc. При работе программы для каждой установки создается лог-файл logN.***, в который записываются используемые при счете параметры, а также сообщения об ошибках, если они возникнут. При расчете диаграмм для нескольких установок в режиме эстафеты (или эстафеты с зонированием) нужно изменять названия файла, в который будет записываться рассчитанная ДНА (например, dia01.dat, dia02.dat и т.д.), а также скорректировать координаты источника и фокуса. Изменить входной файл input.dat или перезагрузить его при этом не нужно.

Программа RAIS использует центральное сечение диаграммы, рассчитанной по программе Beamsu. Это сечение записывается в файл goldia.dat и отображается в графическом окне программы при нажатии на кнопку Plot. Полученный файл goldia.dat следует скопировать в каталог с входными сканами для картографирования.

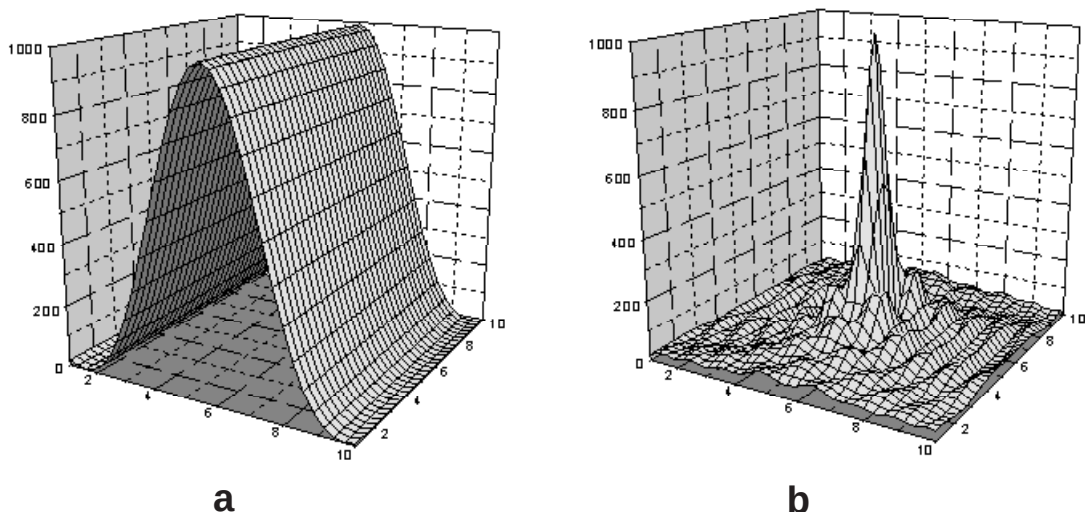


Рис. 1.10: ДНА РАТАН-600 для различных режимов наблюдения, рассчитанные программой Beamsu: а) при наблюдении Солнца на СЕВ в режиме эстафеты; б) в случае наблюдения Солнца в режиме гелиографа с синфазной установкой.

Расчет ДНА для антенной системы ЮП

Для наблюдений в системе ЮП расчет ДНА производится программой `br1` [150], которая установлена, в частности, на серверах `rs.ratan.sao.ru` и `brown.nord.nw.ru`. Эта программа имеет около 20 ключей запуска, которые подробно описаны в `manual`. Изучать использование ключей в данном случае нет необходимости, поскольку RAIS в начале работы при загрузке набора сканов создает командный файл, содержащий строку с нужными ключами. Например, файл для длины волны 3.83 см имеет имя `br3_83` и содержит строку:

```
br1 -d -F beam3_83cm.dat -S0.2 -N22.7962 -N-1 -W3.83142 -k
```

Если программа обнаружит в рабочем каталоге сканы на нескольких длинах волн, она создает еще один файл, с именем `br2`, в котором содержатся командные строки для расчета ДНА на всех найденных длинах волн. Нужно скопировать этот файл на сервер, добавить файлу атрибут “исполняемый” и запустить на выполнение. В результате будут созданы файлы с расчетными ДНА в формате FITS с именами типа `beam3_83cm.fit` (рис. 1.11а). Эти файлы следует скопировать обратно в каталог со сканами.

В принципе, нет необходимости рассчитывать диаграммы каждый раз заново, поскольку в режиме ЮП диаграмма направленности на одной и той же волне в используемом нами приближении не меняется. Из-

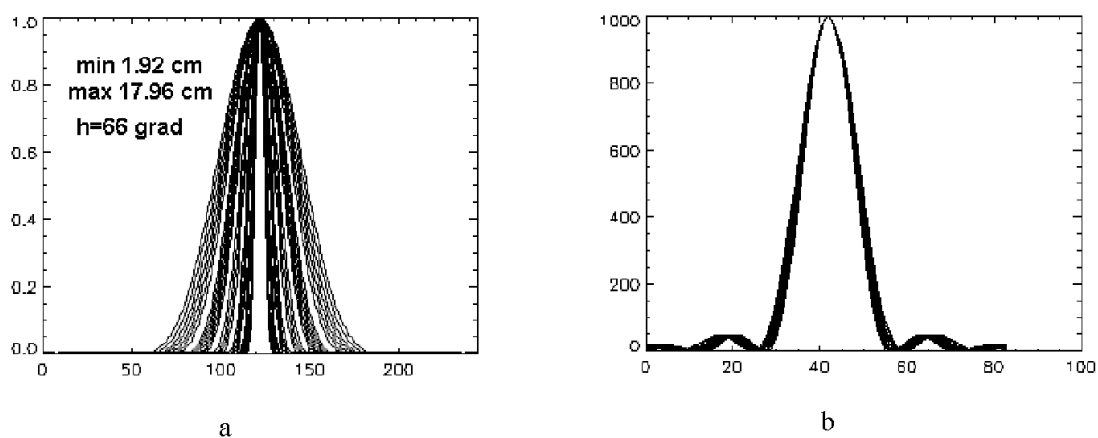


Рис. 1.11: Одномерные ДНА, рассчитанные программой br1: а) для ЮП на 30 длинах волн от 1.92 см до 17.96 см; б) для СЕВ на волне 8.01 см для различных установок в режиме эстафеты.

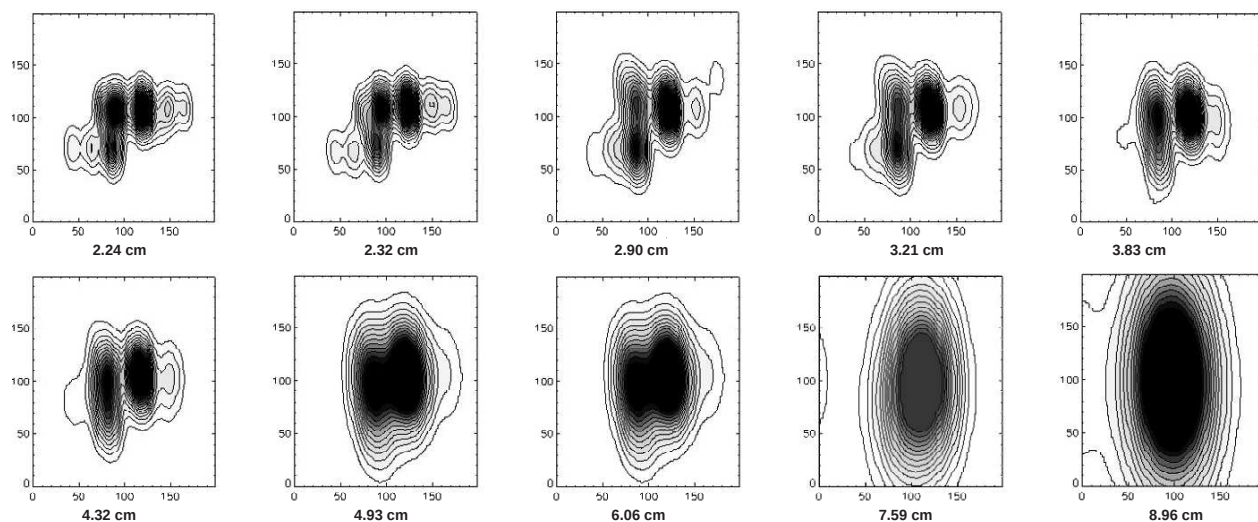


Рис. 1.12: Карты активной области на Солнце на 10 длинах волн от 2.24 см до 8.1 см по наблюдениям на ЮП.

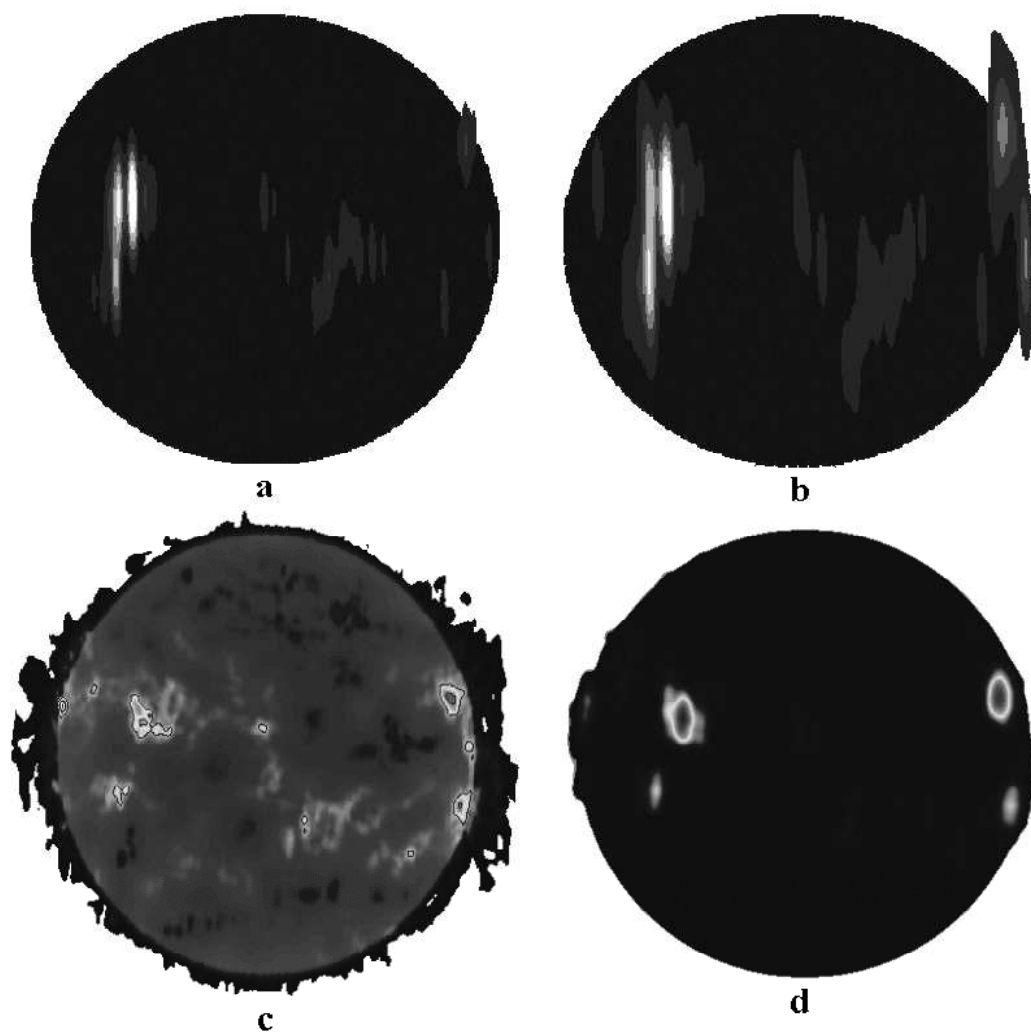


Рис. 1.13: Сопоставление карт Солнца на волне 2.32 см (а), и 3.21 см (b), полученных на ЮП РАТАН-600, с картами радиогелиографов Нобейма (с) на волне 1.76 см и ССРТ (d) на волне 5 см. Источники на картах РАТАН-600 вытянуты по высоте, однако положения источников определены довольно хорошо. Двойной (тройной) источник в северо-восточном полушарии обнаруживает более многокомпонентную структуру на короткой волне 1.76 см и одинарный максимум на более длинных волнах.

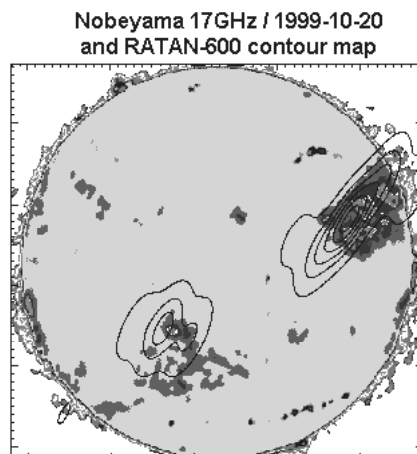


Рис. 1.14: Наложение контурной карты Солнца, полученной на СЕВ РАТАН-600 на волне 8.1 см, на карту, полученную на Нобейама на волне 1.76 см.

менение происходит только в шаге между отсчетами в регистрации, из-за разной скорости прохождения Солнца через ДНА. Так, в дни летнего и зимнего солнцестояния полное время прохождения Солнца через все используемые азимуты составляет 4.5 часов, а в дни равноденствия — 4 часа. Коррекция шага ДНА выполняется уже в самой программе картографирования. В связи с этим в программе используется банк данных, рассчитанных на все длины волн ДНА. Если программа не находит нужной ДНА в текущем каталоге, она берет ее из каталога по умолчанию (например, beams), указанном в RAIS. Необходимость пересчета ДНА для ЮП может возникнуть только при использовании нестандартных установок, например, при наблюдениях с сокращенной апертурой.

1.4 Результаты картографирования

На рис. 1.12, 1.13, 1.14 представлены примеры полученных двумерных карт, построенных по наблюдениям на ЮП и в режиме эстафеты с зонированием. Проведено сопоставление полученных двумерных изображений Солнца с картами Нобейама и ССРТ, которое свидетельствует о хорошем восстановлении положений центров локальных источников. Синтезируемый сектор позиционных углов при наблюдениях на ЮП составляет не больше $\pm 14.5^\circ$, поэтому разрешение по вертикали получается раз в 8-9 хуже, чем разрешение по горизонтали (на волне 3.21 размер синтезированной диаграммы составляет $20'' \times 155''$). Во всяком случае, метод позволяет уменьшить координатную неопределенность по оси у

по сравнению с исходной диаграммой в 20-30 раз, и позволяет разделить потоки источников, которые разнесены по высоте не менее чем на 2 минуты.

1.5 Методика разделения поясов активности на Солнце при сканировании ножевой диаграммой

Как известно, активность на Солнце в основном связана с двумя широтами, в северном и южном полушарии. Места появления пятен в течение цикла солнечной активности образуют "диаграмму бабочки" в начале цикла пятна появляются на средних широтах, а затем, расширяя свой ареал, дрейфуют к экватору. Поэтому основная проблема при наблюдениях с ножевой диаграммой в антенной системе ЮП состоит в том, что в вертикальную диаграмму могут попадать два источника, расположенных на одной вертикали. Возможность разделения потоков излучения двух локальных источников на Солнце, расположенных в разных полушариях, всего за два прохождения через ДНА, дает предлагаемый ниже метод. Он основан на последовательном наведении квазилинейными участками вертикальной диаграммы с разными уровнями на две активные широты. При этом вклад источников x и y в суммарный поток f происходит с весовыми коэффициентами a и b , определяемыми уровнем участка ДНА, которым они сканируются (см. рис. 1.15). Имея два скана, можно разделить потоки с помощью системы линейных уравнений:

$$\begin{aligned} a_1 \cdot x + b_1 \cdot y &= f_1 \\ a_2 \cdot x + b_2 \cdot y &= f_2, \end{aligned}$$

которая решается просто.

Определим зависимость коэффициентов уравнения от величины выноса по высоте Δh , на волне λ , для источника на заданной широте φ . Ограничимся приближением, в котором вертикальная ДНА РАТАН-600 задается функцией:

$$F(x) = e^{-\left(\frac{2l}{\theta}\right)^2}, \quad (1.3)$$

где $\theta = 0.75\lambda[cm]$ — полуширина ДНА в минутах дуги,

l — координата по вертикали в минутах дуги, отсчитываемая от вершины гауссианы.

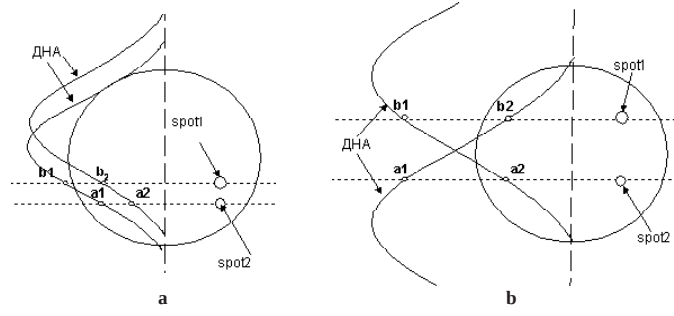


Рис. 1.15: Схема разделения источников на одной вертикали путем сканирования с разными выносами ДНА: а) на короткой волне — источники находятся в одном полушарии; б) на более длинной волне — источники находятся в разных полушариях.

В системе координат с центром в центре Солнца для первого источника имеем: $l1 = \Delta h - h_{\varphi 1}$,

где $h_{\varphi 1} = R_{\odot} \cos(90 - \varphi 1) \cos P$ — координата источника с учетом позиционного угла P .

$$\text{Тогда: } a1 = e^{-\left(\frac{-\Delta h 1 - R_{\odot} \cos(90 - \varphi 1) \cos P}{0.75\lambda}\right)^2}.$$

Отсюда получаем: чтобы источник, находящийся на широте $\varphi 1 = 45^\circ$, попал на уровень ДНА $\frac{2}{3}$ на волне $\lambda = 4$ см, вынос по высоте должен составлять:

$$\Delta h = 12.34'.$$

Для решения данной задачи была написана процедура на языке IDL, под названием `h_split.pro`, которая автоматически разделяет потоки двух заданных источников на всех длинах волн. Задаются широты источников и позиционный угол на момент наблюдений. Входные данные задаются двумя файлами, каждый из которых состоит из трех колонок: частота, суммарный поток в интенсивности I при данном выносе ДНА и суммарный поток в поляризации V . В результате выполнения программы создается один файл из 5 колонок: 1) частота, 2) поток I первого источника, 3) поток I второго источника, 4) поток V первого источника, 5) поток V второго источника.

Проведение многоазимутальных наблюдений попеременно с двумя значениями выноса ДНА по высоте даст возможность исследовать динамику областей, совпадающих по высоте, что недоступно при азимутальном апертурном синтезе или при обычных наблюдениях с несмещенной диаграммой.

Данная методика также помогает решить другую задачу — определить величину выноса по высоте центра вертикальной ДНА РАТАН-600. Для этого нужно пронаблюдать Солнце с заданными выносами ДНА по высоте, выбрать стабильный источник на скане, и по относительному изменению его потока определить величину выноса.

1.6 Использование методики сдвига ДНА по высоте для определения ошибок наведения антенны по высоте в азимутах

Для определения наличия ошибок наведения ДНА по высоте в азимутах было проведено два дня наблюдений с наведением ДНА на разные высоты выше и ниже солнечного экватора по схеме (см. рис. 1.16).

Изменение уровня спокойного Солнца при выносе ДНА промоделировано на рис. 1.17. Диск равномерной яркости сворачивается с двумерной ДНА РАТАН-600. При сдвиге центра вертикальной ДНА вверх на 4 минуты происходит уменьшение уровня спокойного Солнца на 5% и увеличение потока источника, расположенного в северном полушарии, за счет того что максимум вертикальной ДНА проходит дальше от центра Солнца и ближе к источнику.

Из рисунка 1.16) видно, что при выносе ДНА вниз уровень спокойного Солнца уменьшается на меньшие значения, чем при выносе вниз. Сказанное справедливо для всех азимутов. При выносе на величину -4 минуты, уменьшения не наблюдается. При выносе -8 уровень спокойного Солнца в большинстве случаев выше, чем при выносе $+4$. Данные измерения однозначно свидетельствуют о том, что во всех азимутах реальная высота наведения ДНА ниже расчетной. Применение методики, изложенной в предыдущем параграфе, для определения уровня сканирования стабильного источника в двух азимутах показало, что величина выноса составляет около 4 -6 минут. Подобное расхождение с расчетной установкой было замечено еще в ранних наблюдениях на РАТАН-600 по наблюдениям калибровочных источников в меридиане [2]. Причина этой ошибки до сих пор не выяснена. Вообще, наблюдения с выносом по высоте не ухудшают качества наблюдений, но значение выноса должно учитываться при восстановлении потоков источников на коротких волнах, на которых размер вертикальной ДНА меньше диска Солнца.

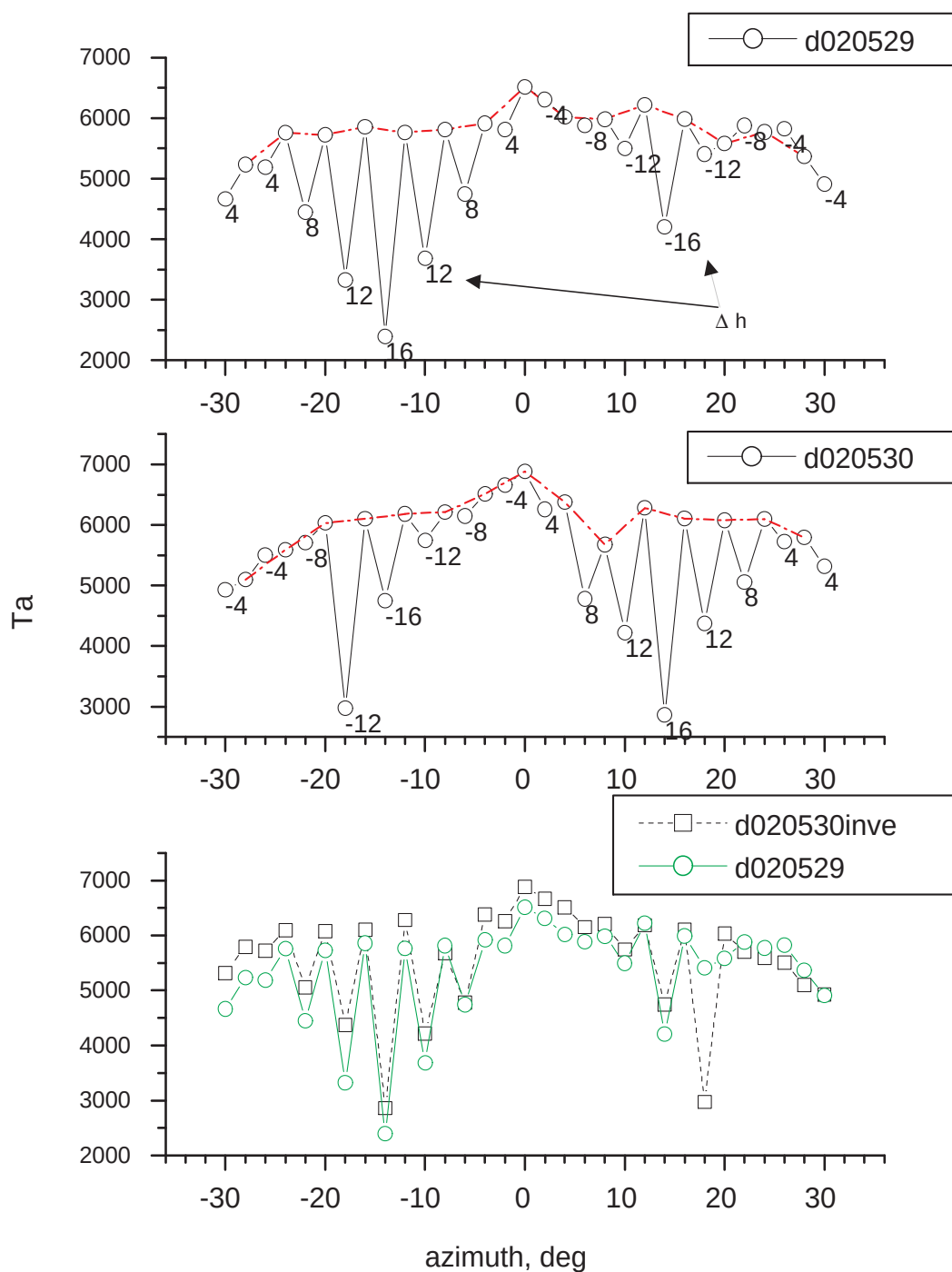


Рис. 1.16: Результаты наблюдения в азимутах с выносом ДНА по высоте на волне 2.32см. Изменение антенной температуры в азимутах: а) при расчетном направлении ДНА выше солнечного экватора в восточных азимутах и ниже экватора в западных азимутах б) вынос ДНА вниз в восточных азимутах и вынос вверх в западных азимутах в) наложение а) с зеркально отображенной б).

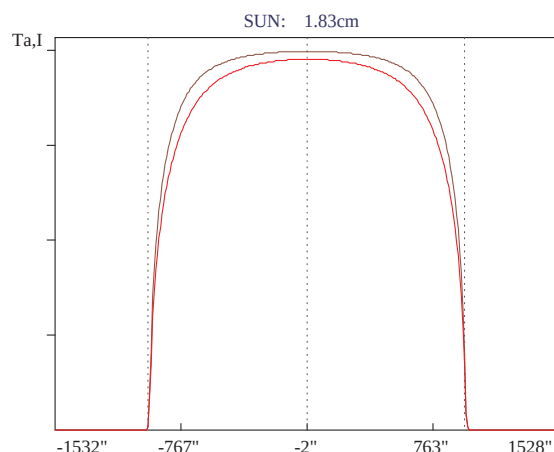


Рис. 1.17: Моделирование выноса ДНА по высоте. Диск равномерной яркости сворачивается с двумерной ДНА ПАТАН-600. При сдвиге центра вертикальной ДНА вверх на 4 минуты происходит уменьшение уровня спокойного Солнца на 5% и увеличение потока источника, расположенного в северном полушарии, за счет того что максимум вертикальной ДНА проходит дальше от центра Солнца и ближе к источнику.

1.7 Программное обеспечение для исследования временных вариаций излучения солнечных структур и сопоставления с данными других обсерваторий

Для обработки данных многоазимутальных наблюдений использовались дополнительные программные разработки, которые опишем ниже.

1.7.1 Программа FITSRAT для сопоставления данных ПАТАН-600 с данными других обсерваторий

В последние годы, в связи с бурным развитием всемирной компьютерной сети, большая часть солнечных данных стала доступна в сети Интернет, на сайтах наземных и космических обсерваторий, а также сборных сайтах, таких как SEC Data library ([119]) и SOHO Synoptic/Summary Database [129]. С 2002 г. международный бюллетень Solar-Geophysical Data уже не публикуется и пользователям предлагается PDF версия в Интернете.

Большой объем информации ставит задачу быстрого и эффективно-го сопоставления данных ПАТАН-600 с данными других обсерваторий, представления этих данных в графическом виде, удобном для восприя-

тия и анализа, и оценки основных параметров источников на Солнце.

Для этих целей в ГСИ разработана программа FITSRAT на IDL с использованием процедур Astrolib, предназначенная для детального сопоставления данных РАТАН-600 с данными Нобеяма, ССРТ, SOHO MDI и других обсерваторий. Программа предоставляет следующие возможности.

- Просмотр 1D и 2D данных в формате FITS и их различное графическое представление: в виде контурных карт, изображений в различных палитрах, трехмерные изображения и т.д.
- Оценки параметров: яркостных температур, потоков, величин магнитных полей, координат источников и т.п.
- Простые операции над изображениями: вычитание постоянного уровня, масштабирование и т.п.
- Поворот на позиционный угол, свертка с двумерной диаграммой направленности РАТАН-600 с преобразование двумерных изображений с Нобеяма и ССРТ в сканы I&V, в формате, который можно считать в программу WorkScan для детального сопоставления и анализа.
- Преобразование SOHO MDI магнитограмм в сканы для WorkScan с фильтрацией слабых полей, для сопоставления с поляризационными данными РАТАН-600.

Как и все программы, написанные на IDL, FITSRAT легко модифицировать и, при необходимости, добавлять новые процедуры.

Использование этой программы для детального сопоставления многоволновых данных РАТАН-600 с данными ССРТ и Нобеяма позволило обнаружить инверсию знака поляризации, связанную с формированием волокна в высотной структуре АО [142].

1.7.2 Программа WAVERAT для вейвлет-анализа данных РАТАН-600

Для анализа временных вариаций по данным многоазимутальных наблюдений РАТАН-600 используется модификация программы Wavelet, которая была разработана сотрудниками ССРТ для вейвлет-анализа

временных рядов [133]. Алгоритм вейвлет-анализа и графический интерфейс не изменены. В меню включен пункт RATAN с выпадающим подменю, которые вызывают две процедуры для подготовки входных данных для вейвлет-анализа, выбирая длину волны и точку на скане. Процедура az_centр.pro совмещает сканы по указанному источнику (по максимуму или минимуму) и создает временной ряд антенной температуры выбранной точки на скане. При выполнении этой процедуры создаются 4 графических файла и 3 файла с данными:

- ◇ наложение всех сканов в азимутах на данной волне в формате GIF (I,V в одном и том же масштабе);
- ◇ временные ряды антенной температуры в каналах I,V указанной точки на скане в виде данных (DAT) и графическом формате (GIF);
- ◇ смещение источника в азимутах от положения в меридиане в формате DAT и GIF.

Так же как и RAIS, программа Waverat работает с предварительно обработанными данными вторичного архива солнечных данных RATAN-600.

В начале текста процедуры задаются параметры, с которыми запускается программа:

- ◁ координата точки, в окрестности которой ищется экстремум для совмещения сканов (для восстановления центра Солнца, или для восстановления положения источников за счет вращения Солнца);
- ◁ окрестность точки, в которой ищется экстремум;
- ◁ знак экстремума (минимум или максимум);
- ◁ координата точки (в отсчетах от найденного места экстремума), для которой вычисляется временной ряд;
- ◁ допустимая разница между центром Солнца и центром записи (если это значение превышено, за центр Солнца принимается центр записи);
- ◁ флаг калибровки (если 1, производится калибровка сканов по точке с минимальной температурой);

- ◁ флаг режима работы без записи в файлы;
- ◁ флаг автономной работы или вызова из Waverat.

Эти и другие параметры можно менять, в зависимости от того, работает процедура автономно или вызывается из Waverat. Если она вызывается из Waverat, предпочтительнее установить ключи, чтобы процедура обработала только одну длину волны, не записывала сканы на диск после восстановления центра Солнца, и не создавала графических файлов. В этом режиме также предпочтительней, чтобы значения координат локального источника, по которому совмещаются сканы, и источника, яркость которого анализируется, запрашивались в интерактивном режиме. После окончания работы процедуры (меню Scans) надо задать параметры вейвлет-анализа (в основном окне) и нажать ОК.

Пример полученных вейвлет-спектров приведен на рис. 1.19. Применение вейвлет-анализа к данным, полученным в многоазимутальных наблюдениях на РАТАН-600, дало возможность обнаружить колебания активных областей с периодами 80, 50 и 30 минут. Данная методика открывает новые перспективы для исследования Солнца на РАТАН-600.

1.7.3 Результаты обработки и перспективы применения метода

Анализ временных вариаций излучения источников на масштабах времени минуты–часы — еще не полностью освоенное на РАТАН-600 направление исследований. Наблюдения Солнца проводились в режиме эстафеты, с промежутком между наблюдениями 20 мин в 1980 г., 14 мин в 1981–1989 гг. и 9 мин в 1999 г. (Голубчина, устное сообщение). Исследования синхронных уярчений, проведенные в режиме эстафеты, могут быть продолжены на ЮП, со значительно более высоким разрешением и в широком диапазоне волн.

На рис. 1.18 приведен пример наблюдений на ЮП в 61 азимуте на волне 3.21 см. Представлено наложение сканов в интенсивности и круговой поляризации, и динамика максимума антенной температуры двух локальных источников на скане в период 4 часов наблюдений. Видно, что в ведущем пятне в этот период произошел микровсплеск, тогда как хвостовое пятно было относительно спокойным.

Благодаря многоазимутальным наблюдениям различные виды инверсии круговой поляризации, которые раньше периодически наблюда-

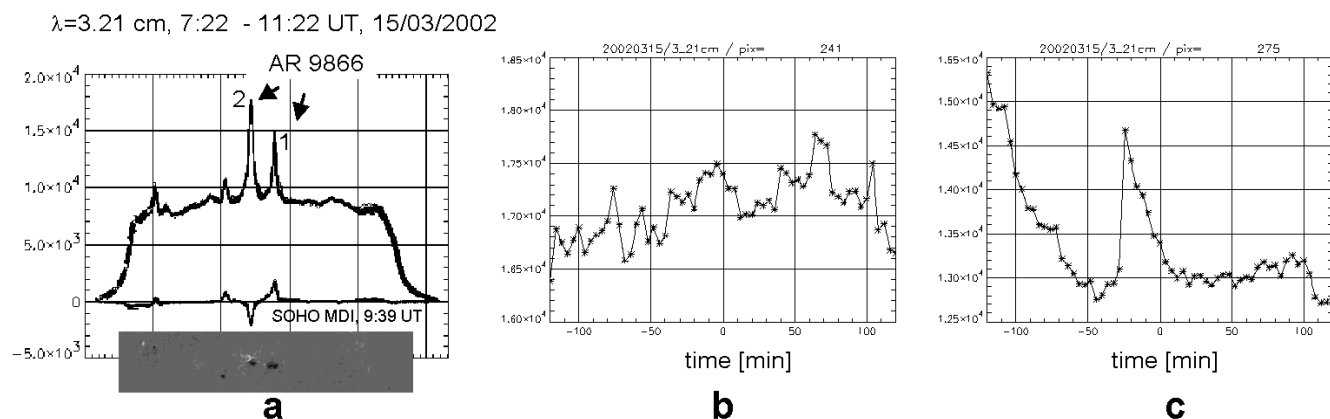


Рис. 1.18: а) Наложение 60 азимутальных сканов и сопоставление с магнитными полями SOHO MDI. Стандартное отклонение антенной температуры точки на спокойном солнце составляет 1 %. b, c) Изменение антенной температуры в азимутах: c) — ведущее пятно (источник 1 на рисунке слева), b) — хвостовое пятно (источник 2).

лись в излучении активных областей, были зарегистрированы в их динамике и отмечена их связь с предвспышечным состоянием мощных активных областей [12]. Дальнейшие исследования в этом направлении и сопоставление с данными других диапазонов могут продвинуть представления о том, как начинается вспышка, и помочь выбрать наиболее реалистичный сценарий вспышки из множества теоретических разработок.

Метод также дает уникальные возможности для исследования колебаний магнитных полей в хромосфере и короне. Высокая чувствительность и умеренное пространственное разрешение телескопа в сочетании с хорошим спектральным разрешением [18] в диапазоне 1–4 см позволяют регистрировать даже небольшие изменения магнитных полей на уровне хромосферы–переходной области–короны. Вейвлет-анализ [51],[149] многоазимутальных данных позволил обнаружить колебания радиояркости активных областей с разными периодами, из которых наиболее заметны 80 минут и 50 минут. На рис. 1.19 (слева) приведены временные ряды антенной температуры локального источника 9866 на нескольких длинах волн коротковолнового диапазона, в канале интенсивности и круговой поляризации. На вейвлет-спектрах (справа) этих временных рядов четко виден период 80 минут. Большой интерес в настоящее время представляет исследование колебаний с периодом около 3-х минут. Возможно, достижение интервала между моментами наблюдений до 2 минут позволит получить новые данные о природе этих колебаний.

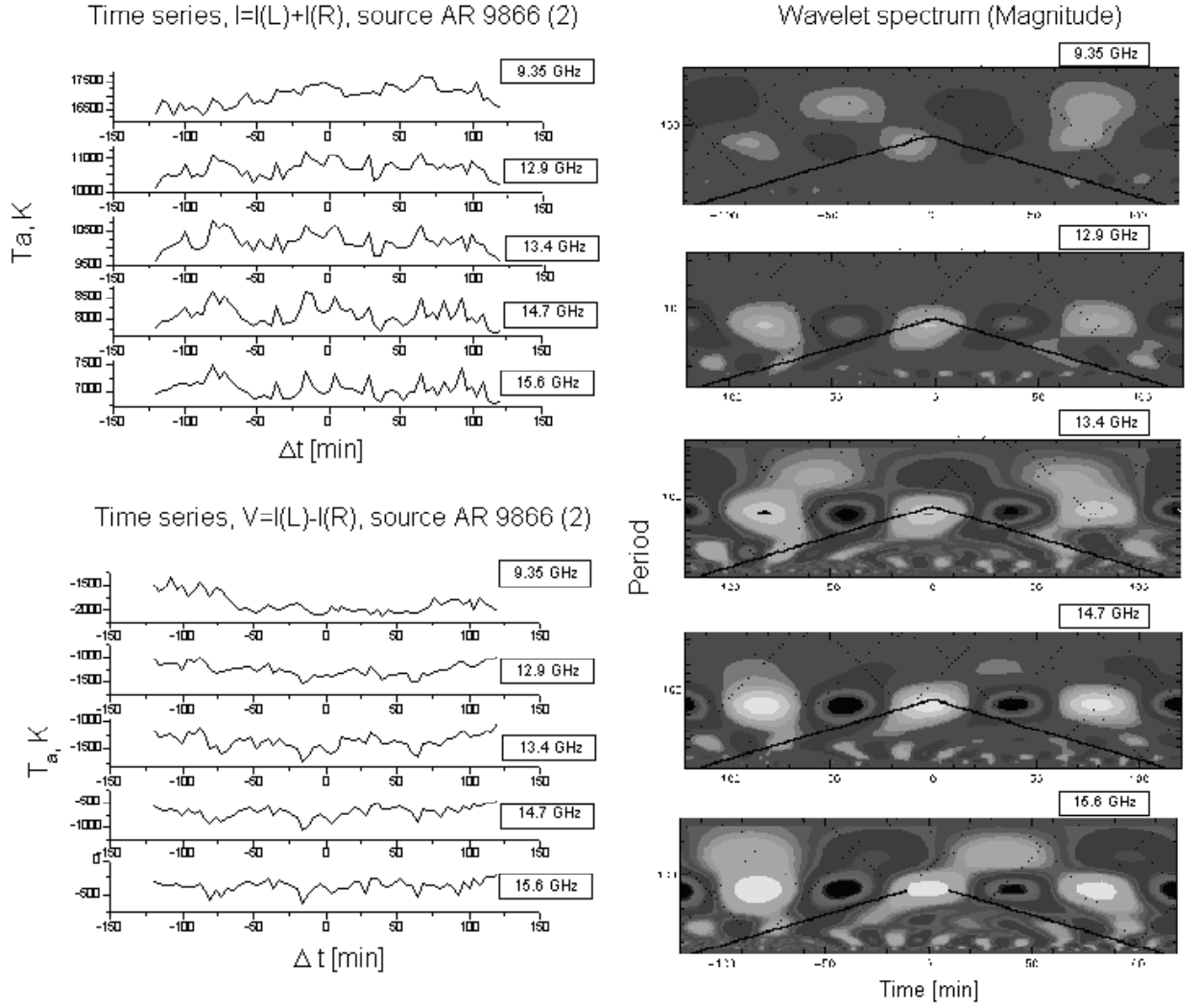


Рис. 1.19: Временные ряды максимума источника в хвостовой части NOAA 9866 (локальный источник 2 на рис. 1.18) в интенсивности и поляризации (слева); и вейвлет-спектр интенсивности радиоизлучения источника 2 (справа) на нескольких частотах. На спектрах в большинстве случаев виден период 80 минут.

1.8 Заключение

Реализация режима многоазимутальных наблюдений на ЮП позволила выполнить следующее.

1. Впервые на РАТАН-600 проведено несколько серий наблюдений Солнца в азимутах от 30° до -30° , с временным разрешением до 4 минут (промежуток времени между сканами 1 мин) в течение 4–4.5 часов.
2. Для обеспечения проведения многоазимутальных наблюдений внесены изменения в существующее ПО, и создано новое ПО для обработки и анализа данных многоазимутальных наблюдений, которое включает:
 - ▷ анализ вариаций излучения различных образований на Солнце,
 - ▷ многоволновое картографирование.
3. Получены двумерные изображения Солнца на 10 длинах волн в диапазоне 2–10 см, и проведено их сравнение с картами Нобейма и ССРТ, которое показало, что восстановление двумерного распределения яркости достаточно хорошее.
4. Предложена методика разделения источников, совпадающих по высоте, при сканировании квазилинейными участками ножевой диаграммы разных уровней.
5. По данным наблюдений Солнца оценены ошибки наведения антенны в азимутах на ЮП. Некоторые ошибки откорректированы, по другим даны рекомендации по методике коррекции при обработке, а также отмечены работы, которые необходимо проделать для улучшения качества наблюдений.
6. Использование разработанного программного обеспечения позволило обнаружить колебания излучения Солнца с несколькими периодами, самый устойчивый из которых равен 80 минутам.

Реализация данного режима наблюдений открывает перспективы для других (не солнечных) направлений исследований на РАТАН-600.

Введение

Исследования предвспышечных явлений в микроволновом диапазоне (обзор)

Режим многоазимутальных наблюдений был освоен в период максимума 23 цикла солнечной активности. В связи с чем, регулярные спектрально-поляризационные наблюдения на РАТАН-600 позволили выделить ряд эффектов в микроволновом излучении активных областей производящих мощные вспышки. Исследование этих эффектов в многоазимутальном режиме дали новую информацию о наличии ранней подготовительной стадии в их предвспышечном излучении.

Задача изучения предвспышечной плазмы важна как для понимания процессов, приводящих к вспышке, так и для выработки критериев предсказания вспышечной активности и протонной активности в особенности. Такие исследования ведутся в широком спектре частот, включая спутниковые наблюдения в ультрафиолете, рентгене [28], оптическом диапазоне и во всем радиоастрономическом диапазоне от мм волн [92] до метровых волн [20]. Проявления предвспышечного состояния плазмы (предвестники вспышек) регистрируются на интервалах времени более длинных, чем импульсная фаза вспышки, но более коротких, чем процесс эволюции активной области и представляют собой непрерывные изменения, переходящие во вспышку [95].

Согласно современным представлениям, вспышка чаще всего зарождается на уровне хромосферы и нижней короны, а затем распространяется на более высокие уровни (в корону, регистрируемую в рентгене) и на нижележащие уровни (фотосферу, регистрируемую в оптическом диапазоне). Информацию об эволюции магнитных структур на уровнях, где инициируются вспышки, в настоящее время можно получить только с помощью многоволновых радионаблюдений в широком микроволновом диапазоне [40], [116]. В отличие от рентгеновских и УФ наблюдений,

которые дают возможность регистрации только горячих и плотных корональных петель, радионаблюдения чувствительны к весьма небольшим изменениям в магнитосфере во всей предвспышечной области, и могут давать картину распределения магнитных полей по высоте. Поэтому основные свойства предвспышечной плазмы должны четко проявляться именно в радиодиапазоне. Кроме того, наблюдения в радиодиапазоне обладают преимуществами и по отношению к таковым в оптическом диапазоне излучения (более высокая чувствительность и меньшая зависимость от погодных условий), и в рентгеновском (дешевизна проведения наблюдений). Но, несмотря на вышеуказанные преимущества, большинство исследований предвестников ведется не в радиодиапазоне, а в оптике и рентгеновском излучении.

Широкое разнообразие предвспышечных явлений наблюдается в разных диапазонах излучения от рентгеновского до ультрафиолетового см. обзоры [132], [95], [5], [115]. Наиболее изучены процессы, связанные с активацией волокна (отмечено перед 80% вспышек в H_{α}). Подмечено также, что всплытие нового магнитного потока и усложнение структуры магнитного поля, особенно образование дельта - конфигурации, ведет к возникновению вспышек. Более часто вспышки происходят в АО, большая полуось которых сильно наклонена к плоскости солнечного экватора. Начиная с работ Северного [121], [103]), отмечалось, что области генерации мощных событий связаны с местами высоких значений вертикальных токов в АО. Повышенная вспышечная активность характерна также для АО, где наблюдается движение пятен, сигмоидные структуры в рентгене, вихревые процессы и т.п.

Предвестники в радиодиапазоне были обнаружены еще в ранних радионаблюдениях как изменения в интенсивности и/или в поляризации излучения активной области, наблюдаемые в интервале десятки минут – минуты перед регистрацией вспышки. Первоначально под предвестниками в радиодиапазоне понимали только маленькие всплески (5 — 10% потока последующего всплеска) в интенсивности, происходящие перед большими всплесками. В работе Каи и др. [64] сделана попытка классификации и приводятся результаты статистических исследований предвестников различных типов по наблюдениям 97-ми всплесков на волне $\lambda = 1.76$ см на интерферометре в Nobeyama (Япония), с чувствительностью 0.5 с.е.п. Характерное время от начала предвестника до начала всплеска составляет 10-35 минут, со средним значением 25 минут. Заре-

гистрированная продолжительность “пред-всплесков” не более 5 минут. Вероятность того, что всплеску с интенсивностью в максимуме > 10 с.е.п. предшествует меньшая активность, была оценена как $\sim 25\%$, но для всплесков с > 500 с.е.п. вероятность возрастает в два раза - до $\sim 50\%$.

Последующие спектральные наблюдения позволили обнаружить новые спектральные и поляризационные свойства предвестников.

Так, исследования радиоизлучения Солнца на многоэлементных интерферометрах в диапазоне $\lambda = 3$ см и $\lambda = 8$ см с разрешением $1',1$ позволили определить спектрально-поляризационные особенности излучения АО перед большими (протонными) вспышками. Критерий протонности вспышек был предложен Танака и Какинума [135]. Выявленные для XIX цикла солнечной активности закономерности (в 17-ти событиях из 19-ти) в последующем, XX цикле, были модифицированы Танака и Эноме [136]. Согласно критерию Танаки-Эноме, вывод о возникновении протонной вспышки можно сделать при выполнении следующих условий ():

- спектр s-компоненты должен быть близким к плоскому в диапазоне $\lambda \sim 3 - 8$ см; соотношение потоков $F_{3cm}/F_{8cm} \geq 0.8$ при величине плотности потока $F_{3cm} > 10$ с.е.п.;
- источник s-компоненты должен иметь т.н. p-конфигурацию в распределении круговой поляризации радиоизлучения по источнику (один основной и два малых пика противоположной полярности по обе стороны от основного).

В дальнейшем другими исследователями делались попытки модифицировать критерий Танаки-Эноме, или предлагались другие спектральные критерии по наблюдениям на других инструментах. Так, по наблюдениям с разрешением $3' \times 3'$ на волне 0.8 см в период 1972-1974 и на основе данных полного потока из бюллетеня SGD на длинах волн 1.9, 3.4, 6.0, 10.7, 11.1, 21.2, 49.5, 73.2 и 122.4 см Стеффен [131] отметил уменьшение величины спектрального индекса сантиметрового получения (вплоть до смены знака (индекса) в коротковолновой части диапазона) как признак предвспышечного состояния АО. На основе анализа многоволновых данных из SGD Ипатовой и Ясновым [61] было предложено использовать отношение F_{11cm}/F_{20cm} как более эффективный критерий протонной вспышечной активности. По наблюдениям на БПР также предлагалась мо-

дификация критерия с использованием других длин волн (2.3 и 4.4 см - [42], [73]).

С вводом в строй инструментов с высоким пространственным разрешением (WSRT, NHR, VLA, CCPT) появилась возможность анализировать процессы с более мелкомасштабными характеристиками.

На VLA ($\lambda = 2\text{см}, 6\text{см}, 20\text{см}$) были проведены серии исследований предвспышечных изменений в активных областях. Так, Вилсон [81] заметил увеличение температуры с $10^{6.3}$ до $10^{6.7}$ К в предвспышечном излучении активной области на ($\lambda = 6\text{см}$ перед событием 4.09.80. Предвспышечный нагрев до $10^{6.8}$ наблюдался и в излучении на ($\lambda = 20\text{см}$ [154], как градуальная компонента, которая развивается за несколько минут перед импульсной фазой. Такая компонента наблюдалась только в одном случае из восьми наблюдений. Ванховен и др. [146] указывают, что наблюдаемая редкость предвестников может быть связана с тем, что предвестники характеризуются относительно узкой полосой частот существования.

Анализ двумерных радиокарт [97], составленных по результатам наблюдений на VLA 14 ноября 1981 года нескольких всплесков в одной активной области на $\lambda = 6$ и 20см с временным разрешением ~ 10 сек и пространственным разрешением $13'' \times 13''$ и $20'' \times 20''$, показал, что на предвсплесковой стадии за несколько минут до импульсной фазы происходит существенное изменение структуры поляризованного излучения и степени поляризации, а также увеличение радиояркости, указывающие, по мнению автора, на нагрев области излучения.

В связи с тем, что минимально обнаружимая степень поляризации на VLA составляет 10% , регистрация небольших изменений в поляризации на этом инструменте затруднена, и обнаруженные предвспышечные явления касались в основном изменений в интенсивности микроволнового излучения. Например, в работе Кунду и др. [82] при исследовании предвсплесковой эволюции активной области на волнах 2, 6 и 20 см карты в поляризации даже не были построены из-за низкого качества исходных данных. Авторы делают заключение, что наиболее общим проявлением предвспышечного состояния активной области является заметное *увеличение* интенсивности и поляризации сантиметрового радиоизлучения над активной областью за десятки минут по начала вспышки. Такой же вывод сделан в работе [84] на примере наблюдения пяти событий. Возможно, редкое заполнение спектра на VLA не позво-

лило обнаружить предвспышечные явления в виде инверсий круговой поляризации. Такие явления были обнаружены в первом систематическом изучении предвестников на OVRO (46 частот в диапазоне 1-18 ГГц, чувствительность по потоку 0.4 Jy). Харфорд и Зирин [60], основываясь на наблюдениях на одной, но характерной частоте (10,6 ГГц) сделали заключение, что наиболее часто предвспышечные изменения проявляются в виде *уменьшения* поляризованного излучения и смены знака поляризации в интервале от нескольких минут до десятков минут перед началом импульсной фазы (статистический вывод: у 11% мощных солнечных вспышек наблюдается значимое (до $\sim 50\%$) изменение параметра Стокса V). Такой разноречивой в выводах о характере предвспышечных изменений в интенсивности и поляризованном излучении был связан, по видимому, с тем, что на VLA пропущен самый значимый (согласно нашим результатам) для предвспышечных признаков интервал длин волн - от 2 до 5 см. Позже при наблюдениях на VLA была обнаружена смена знака поляризации на волне 6 см перед вспышкой 1B/M4 25 июня 1985 в AR 2522 [81]. В этой же работе сообщалось о появлении нескольких новых поляризованных (40-60%) источников в структуре АО на предвспышечной фазе. При этом было отмечено, что никаких значимых изменений на уровне фотосферы при этом не происходило, поэтому объяснять появление поляризованных источников и смену знака традиционно, как проявление всплытия магнитного потока на фотосфере, не представлялось возможным.

Хотя первые сообщения о предвспышечных поляризационных изменениях относятся, к субвспышкам [86], существует ряд наблюдений, свидетельствующих о значимых изменениях в поляризации излучения перед всплесками (см., например, [87] [79]. Так, импульсный всплеск 14.09.79 [64] имел правую поляризацию $\sim 25\%$, тогда как во время излучения предвестника степень поляризации составляла $\sim 10\%$ с небольшим понижением непосредственно перед импульсной фазой.

По наблюдениям на VLA Кунду [78], [80] были обобщены предвспышечные признаки следующим образом: для возникновения вспышки непосредственно перед импульсной фазой, за несколько минут до неё, должны наблюдаться следующие явления:

- резкие изменения поляризации (структуры и степени поляризации) локальных источников, вплоть до смены знака;

- изменение ориентации нейтральной линии, разделяющей источники с разными знаками поляризации;
- появление новых источников вблизи места будущей вспышки.

Как мы видели выше, новые источники могут возникать не только в связи со всплытием нового магнитного потока на фотосфере, но также при отсутствии каких-либо изменений на фотосфере. К этому классу источников можно отнести так называемые источники над нейтральной линией (NLS) [81] или пекулярные источники [89], которые наблюдались во вспышечно-активных областях, в том числе на РАТАН –600 [147] и ССРТ [134]. В последней работе отмечено ”ступенчатое” зарождение этих межпятенных источников, что говорит о связи этого явления со ”ступенчатыми” предвестниками, которые были отмечены еще в ранних наблюдениях полного потока от Солнца [64], и подробно изучались на РТ-22 КАО [69]. Наблюдения в узком диапазоне (8-12 ГГц), но с подробным спектральным разрешением (~ 120 МГц) [137] для событий ноября 1981 года выявили, что для 30 событий не менее 30% всплесков средней интенсивности связаны с предвестниками типа ”ступенчатого” подъема излучения. Было показано, что поток радиоизлучения предвестника убывает с ростом частоты в исследуемом диапазоне, и по мере приближения к импульсной фазе всплеска спектральный индекс излучения предвестника уменьшается (по абсолютной величине) вплоть до нуля. С помощью той же аппаратуры было [90] обнаружено изменение степени поляризации (неодновременное по диапазону) активной области во время ”ступенчатого” предвестника импульсного всплеска. Степень поляризации излучения предвестника сначала возрастает до величины $\sim 10\%$ на высоких частотах и в течение 8-10 секунд достигает этой величины во всем рассматриваемом диапазоне, уменьшаясь перед импульсной фазой всплеска до нуля.

По наблюдениям на РАТАН-600 и ССРТ также были зарегистрированы значительные изменения в излучении s-компоненты в предвспышечный период развития активной области ([35],[3], [128]) .

В перечисленных работах наблюдаемые предвспышечные явления, как правило, интерпретируются как отражение процессов, связанных со всплыванием новых магнитных потоков, и их взаимодействием с существующей структурой активной области.

Поскольку проблема прогнозирования геоэффективных событий на

Солнце связана с необходимостью учета многих факторов, существует ряд работ, в которых применяется многопараметрический подход к задаче прогнозирования [57],[130], [24], [109].

Критерий краткосрочного прогноза мощных солнечных вспышек, учитывающий физические особенности генерации микроволнового излучения в области источника и его распространения в короне активной области, предложен в [94].

Еще один класс предвспышечных явлений в микроволновом диапазоне - короткопериодические осцилляции, также регистрируемые на масштабах времени минуты - часы - дни перед вспышками. По наблюдениям микроволновых ($\lambda = 3$ и 10 см) всплесков в Астрономической обсерватории Nanjing в течение 1979 года было обнаружено, что перед всеми всплесками наблюдаются осцилляции с периодами от нескольких до десятков секунд и амплитудой около 1% невозмущенного излучения [156]. Причем такие осцилляции появляются перед всплесками за несколько часов или даже за несколько дней, что, по-видимому, характеризует процесс аккумуляции энергии во вспышечной области.

На возможность проявления предвспышечных волновых и колебательных процессов во флуктуациях радиоизлучения указывалось в [69]. Авторы [8] предлагают использовать рост флуктуации в качестве дополнительного критерия при прогнозировании протонных вспышек. Об усилении амплитуды долгопериодных пульсаций ($T \sim 5-120$ мин) перед солнечными вспышками сообщается и по результатам наблюдений радиоизлучения на РТ-22 (1972-1982 гг.) и на ТНА (1981-1982 гг.) в сантиметровом диапазоне [6]. Согласно наблюдениям [76], флуктуации в радиоизлучении перед вспышкой за несколько минут коррелировали с флуктуациями в рентгене.

Все экспериментальные исследования, результаты которых приведены выше, носили, в основном, ограниченный характер и содержали данные по временной динамике излучения на одной частоте, с низким спектральным разрешением или в узком диапазоне длин волн. Дальнейший прогресс в изучении предвспышечных ситуаций в микроволновом диапазоне может обеспечить высокое спектральное разрешение при наблюдениях в широком диапазоне волн и повышение чувствительности измерений, как по плотности потока, так и по степени поляризации. Эти факторы являются определяющими при исследованиях тонкой вертикальной структуры магнитного поля в активной области.

Несмотря на наличие в мире разнообразных радиотелескопов с высоким пространственным разрешением (от радиогелиографов - интерферометров до рефлекторных антенн), подробный анализ спектра реализуется лишь на двух телескопах: РАТАН-600 ([74] и OVRO [60], которые полностью перекрывают диапазон частот 1 - 18 ГГц. Последний анализирует этот диапазон частот последовательно, переходя от одной частоты к другой, и имеет узкие полосы анализа, что значительно понижает чувствительность измерения поляризации. РАТАН-600 имеет более широкие полосы в частотных каналах, осуществляет параллельный анализ с частотным разрешением около 5%, и имеет большую эффективную площадь. Однако этот инструмент имеет одномерную диаграмму направленности, что снижает эффективность его использования при исследовании слабых источников, ввиду влияния излучения посторонних источников (эффект путаницы). Но при изучении ярких активных областей этот эффект незначителен. Начиная с 2000 года, мы используем на РАТАН-600 режим многократных азимутальных наблюдений (со скважностью 4-8 минут/скан). Это значительно улучшило достоверность спектральных измерений поляризованного излучения активной области, и позволило обнаружить ряд явлений, непосредственно связанных со вспышечной активностью в широком временном интервале.

Некоторые наблюдения особенностей микроволнового излучения вспышечных АО по данным РАТАН-600

Следует признать, что до введения режима многократных наблюдений на РАТАН-600, исследования радиоизлучения вспышечно-продуктивных активных областей были сильно ограничены по временному разрешению (одно наблюдение в сутки). Это накладывало в свою очередь, ограничения на изучения временных вариаций и исследования сводились к изучению стабильных и квази стабильных АО. Тем не менее ряд результатов, связанных со вспышечными областями был получен. Ниже изложено краткое содержание двух работ, выполненных при участие автора на основе однократных наблюдений, проведенных в режиме мониторинга. Результаты этих работ указывают на то, что широкодиапазонные радионаблюдения с хорошим спектральным разрешением являются уникальным инструментом для диагностики параметров плазмы в актив-

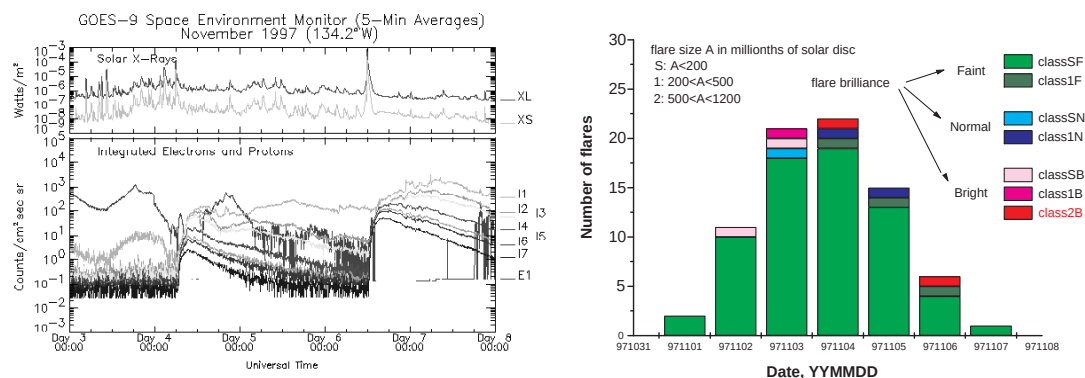


Рис. 1.20: Вспышечная активность активной области NOAA 8100, по данным GOES (слева) и количество оптических вспышек по дням с 1 по 7 ноября 1997 по данным бюллетеня Solar-Geophysical Data (справа)

ных областях.

Изменения в спектре поляризации NOAA 8100 в предвспышечный период.

В работе [17] исследованы особенности в спектре поляризованного излучения в предвспышечный период активной области NOAA 8100 (СМР 4 ноября 1997г), которая произвела две мощные вспышки: 4 ноября (2В/Х2) и 6 ноября (2В/Х9) (см рис. 1.21), которые были первыми вспышками класса Х в текущем 23-ем цикле солнечной активности. Область появилась на диске 28-го октября, и имела простую биполярную магнитную конфигурацию до 3-го ноября, когда всплытие нового магнитного привело к образованию дельта-конфигурации. Одновременно в спектре поляризации в коротковолновом диапазоне наблюдался рост поляризованного излучения с максимумом около 13 ГГц (см. рис 1.21). Появление избыточного излучения левой круговой поляризации в диапазоне 10-16 ГГц интерпретировалось как всплытие нового магнитного потока на уровне хромосферы - нижней короны величиной около 800-2000 гаусс. При этом в качестве предвспышечного признака предлагалось рассматривать избыток одного знака в интегральном потоке в спектре поляризации. Согласно нашим сегодняшним представлениям, наблюдаемые в NOAA 8100 предвспышечные спектрально- поляризационные изменения являются частным случаем явления, которое описывается в главе 3.4.1 и названо нами А2-эффектом.

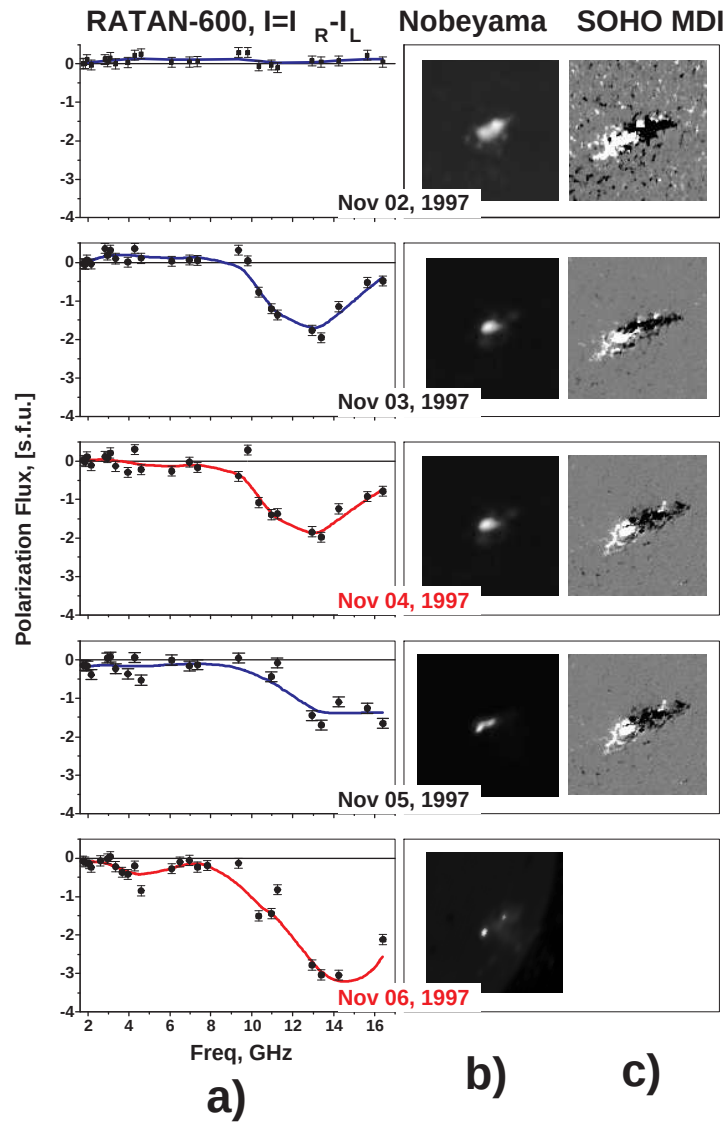


Рис. 1.21: Слева: спектры поляризованного потока интегрированного по всей активной области NOAA 8100 (а). В середине: радиокарты Nobeyama на волне 1.76см (b). Справа: фотосферные магнитограммы SOHO MDI (с). Вспышки происходили 4 и 6 ноября. За два дня до первой вспышки поляризация в области незначительная, наблюдается баланс правой и левой поляризации по спектру. За день до вспышки появилось преобладание одного знака поляризации на длинных волнах, и поляризованного потока противоположного знака на коротких волнах. Перед первой вспышкой избыток потока левой поляризации в диапазоне 2-3 см составляет около 2 с.е.п., а поток излучения в интенсивности 10 с.е.п. Перед второй вспышкой избыток одного знака поляризации над другим достигает 3.5 с.е.п., а поток в интенсивности достигает 15 с.е.п.

Радио наблюдения активной области с аномально низкой вспышечной продуктивностью

Важность комплексного рассмотрения поведения активной области как в радиодиапазоне, так и в оптическом и рентгене может быть продемонстрирована на примере активной области AR 8108 (СМР 20 ноября 1997 г.), [112]. Анализ радиоизлучения этой области, которая по признакам в рентгене (сигмоид) и оптике (дельта-конфигурация), должна была быть вспышечно-продуктивной, но давала только слабые вспышки (множество вспышек класса SF, с самой большой вспышкой класса 1N), показал, что в радиоизлучении этой АО более 4 дней существовала необычная деталь, отождествленная с одним из оснований стримера, берущего начало в дельта - конфигурации фотосферного магнитного поля.

На Рис. 1.22 b,c приведены распределения яркости в канале интенсивности на волне 3.21 см за два дня, 19 XI и 21 XI. Штриховыми кривыми показано разделение Локального Источника (ЛИ) радиоизлучения на отдельные компоненты с использованием гаусс-анализа. В структуре ЛИ были выделены детали трех типов : (1) детали А, В и С - это яркие компактные источники, связанные с основными пятнами группы, А и В - головное и хвостовое пятна соответственно, С - новое пятно, образовавшееся между ними 21 XI (Рис. 1.22, c); (2) деталь Н - гало, протяженный источник с размерами порядка размеров всей АО, ассоциирующийся с ее магнитосферой, в вершине которой удерживается излучающая плазма; (3) деталь Х - "пекулярный источник" [147], который мы отождествляем с яркой частью петель в основании коронального стримера, протяженностью ~ 20 тыс. км. Для всех выделенных деталей ЛИ были получены спектры потоков, яркостных температур и степени поляризации. Для трех дней 19 - 21 XI они усреднены и представлены на Рис. 1.23. По этим характеристикам можно судить о природе излучения каждой детали. Наиболее интересна деталь Х, характеристики которого, а именно, плоский спектр потока $F(\nu) = const$, а также квадратичный рост спектра радиояркости $T_B \sim \lambda^2 (\lambda > 2 \text{ см})$ и линейный рост степени поляризации с ростом длины волны $p \sim \lambda$, ($15 \text{ см} > \lambda > 2 \text{ см}$) дают основание предположить, что это был оптически тонкий в см диапазоне источник тормозного излучения. Исходя из этого, были оценены его параметры - плотность плазмы N и напряженность магнитного поля B . Для теплового тормозного излучения оптически тонкого источника размером Δs ,

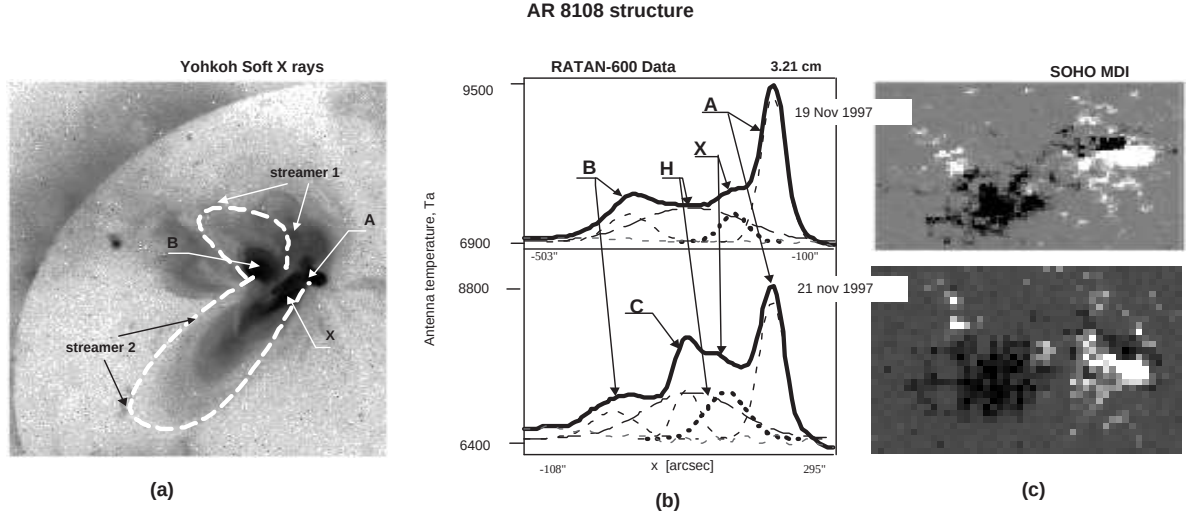


Рис. 1.22: (a) Схематическое выделение стримеров на рентгеновском изображении с Yohkoh. (b) Структура активной области в радиоизлучении по данным РАТАН-600. Деталь X ассоциируется с основанием коронального стримера. Деталь C отождествлена с межпятненным источником на фотосфере. (c) Магнитные поля на фотосфере.

находящегося при корональной температуре T и имеющего яркостную температуру излучения T_B на частоте ν имеем соотношение [4]:

$$T_B \approx 0.2 \times N^2 \times \Delta s \times \nu^{-2} \times T^{-1/2} \quad (1.4)$$

При $\Delta s = 2 \cdot 10^9$ см, $T_B = 1.2 \cdot 10^6$ К, $\nu = 4.3 \cdot 10^9$ Гц ($\lambda = 7$ см), $T = 2.0 \div 2.5 \cdot 10^6$ К, получаем $N = 7 \cdot 10^9$ см $^{-3}$.

Для модуля продольной компоненты магнитного поля B_l источника, имеющего на волне λ , степень круговой поляризации p [38]:

$$B_l \approx 54. \times \lambda^{-1} \times p \quad (1.5)$$

При $\lambda = 4$ см, $p = 4\%$, $B_l \sim 50$ Э. Напомним, что это значение поля получено для высоты $h < 2 \cdot 10^9$ см в основании коронального стримера.

Отношение газокINETического и магнитного давлений β в источнике равно:

$$\beta \approx \frac{8\pi \times N \times k \times T}{B^2} \sim 0.02 \quad (1.6)$$

(здесь $k = 1.38 \cdot 10^{16}$ эрг·град $^{-1}$ - постоянная Больцмана)

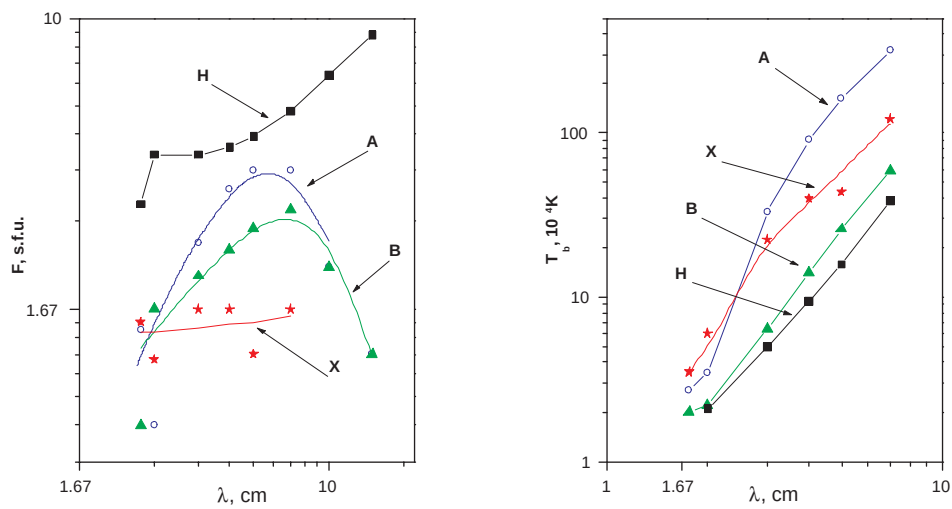


Рис. 1.23: Спектры плотностей потока и яркостных температур деталей AR 8108. Детали А и В, отождествленные с пятнами, имеют спектры, характерные для циклотронного излучения, с некоторой добавкой тормозного излучения в случае В. Спектр детали Н типичный для гало, нетепловой. У детали Х, отождествленной со стримером, плоский спектр потока, характерный для теплового тормозного излучения.

Что касается вспышечной активности AR 8108, и соответствующих предвспышечных признаков, первые две составляющие критерия Танаки-Эноме оказались близки к граничным значениям: (1) плотность потока радиоизлучения от всей АО на волне 3 см $F^I(3 \text{ см}) \sim 7$ с.е.п. (что немного меньше граничного значения 10 с.е.п.) (2) отношение потоков $F^I(3 \text{ см})/F^I(10 \text{ см}) = 0.7$ (то есть ~ 1). Прогноз на основе третьей составляющей критерия был бы отрицательным: изображение AR 8108 в поляризованном свете на волне 3 см имело S-форму, далекую от вспышечно-опасной P-формы. В целом можно считать, что критерий Танаки-Эноме в данном случае оправдывается - AR 8108 действительно не давала мощных вспышек. Однако делать этот вывод надо с осторожностью, учитывая близость двух составляющих критерия к граничным значениям. В то же время, согласно признакам на фотосфере (ярко выраженная дельта-конфигурация), в рентгене (сигмоид, стримеры) и бурной динамике развития этой АО (всплытие нового магнитного потока), эта область должна была быть вспышечно-продуктивной.

По-видимому, физические условия в АО были таковы, что избыточная энергия сложного (непотенциального) магнитного поля высвобождалась не в виде взрывного процесса, а постепенно. Можно предположить, что медленный (по сравнению со вспышками или КВМ) отток накапливаемой энергии осуществлялся через два корональных стримера, поддерживая их послевспышечный вид в течение нескольких суток. Кроме того, согласно результатам наблюдений, исследуемая активная область обладала повышенной (по сравнению со среднестатистической) яркостью радиоизлучения. По всей вероятности, повышенная яркость указывает на присутствие в атмосфере АО некоторого количества высокотемпературной плазмы, которая сохранялась длительное время, сравнимое со временем существования самой АО. Такой дополнительный нагрев проявлялся как в нижней короне - в области сильных магнитных полей (ядерная компонента ЛИ), так и высоко в короне в вершине магнитосферы (гало ЛИ)

Результат, полученный при исследовании AR 8108, позволяет сделать предварительный вывод о том, что по характеристикам пекулярных деталей можно судить, по какому сценарию будут развиваться события в данной АО. Если излучение пекулярных источников характеризуется крутым спектром потоков (синхротронное излучение), тогда следует ожидать событий взрывного характера (в виде вспышек). Если

пекулярный источник имеет плоский спектр (тормозное тепловое излучение), тогда активные процессы будут протекать гораздо медленнее, в форме, которую условно можно назвать вялотекущей вспышкой.

Дальнейшие исследования вспышечно-продуктивных активных областей (см. главы 2 и 3) показали, что в спектрах их поляризованного излучения в микроволновом диапазоне существуют эффекты, указывающие о наличии длительной подготовительной стадии перед генерацией мощных вспышек.

Глава 2

Микроволновое ”потемнение” активной области NOAA 9077 перед протонной вспышкой 14 июля 2000г.

В данной главе представлены результаты наблюдений активной области (АО) NOAA 9077 в течение нескольких дней перед мощной протонной вспышкой 14 июля 2000 г. Описываются два обнаруженных эффекта - предвспышечное микроволновое ”потемнение” и узкополосная двойная инверсия круговой поляризации, а также дана интерпретация обнаруженных явлений. Описана методика обработки и сопоставления данных.

2.1 Введение

Предвспышечное состояние магнитосферы солнечной активной области (АО) на уровнях хромосферы и короны исследовано недостаточно полно. Всплытие нового магнитного потока (появление новых петель), его взаимодействие со старым магнитным полем (со старыми петлями), формирование токовых слоев и волокон, извержение волокон - все эти эффекты могут быть причинами возникновения вспышек ([54], [56], [126]). Естественно предположить, что предвспышечная активность на фотосфере должна приводить к изменениям магнитной структуры и сопровождаться дополнительным притоком энергии в основание короны, ведя таким образом к значительному увеличению интенсивности микроволнового излучения на коротких волнах ([136] и др.). Но последнее не всегда подтверждается наблюдениями. Например, по наблюдениям полного

потока на малых телескопах давно известны случаи краткосрочных (в течение десятков минут) депрессий радиоизлучения перед вспышками (см., например, [26], на 2800 MHz или [117]). Относительно недавние наблюдения с высоким пространственным решением на радиогелиографе в Нобеяма (NRH, 17 MHz) также показывают, что на предвспышечной стадии возможны как усиления радиоизлучения АО, так и его ослабления [32]). Долговременное микроволновое потемнение (уменьшение радиояркости) перед довольно слабой вспышкой в АО 8038 12 мая, 1997 было замечено также в данных наблюдений РАТАН-600 [18]).

Основываясь на широкодиапазонных (1.74 - 30 см) микроволновых наблюдениях на РАТАН-600, с привлечением данных радиогелиографа Нобеяма (NRH) на волне 1.76 см и Сибирского Солнечного Радиотелескопа (ССРТ) на 5.2 см, нами проведен анализ эволюции радиоизлучения АО 9077 на предвспышечной стадии перед протонным событием 14 июля 2000г. Эта область испытывала устойчивое и значительное уменьшение микроволнового излучения в течение 3 дней перед вспышкой.

Предлагается интерпретация наблюдаемых явлений как проявление постепенного формирования волокна в высотной структуре АО. Дестабилизация этого волокна, по-видимому, явилась причиной мощной вспышки с корональным выбросом масс (КВМ).

Солнечные волокна, которые также называются протуберанцами (вид на лимбе), представляют собой плотные (примерно в 500 раз больше плотности окружающей короны) и холодные (температура в 200-500 раз меньше корональных значений) плазменные образования, расположенные над нейтральной линией фотосферных магнитных полей. Магнитные поля короны поддерживают плотную массу волокна в гравитационном поле и изолируют от горячей окружающей материи. Волокна могут иметь длину от 60 000 до 600 000 км, высоту $10000 \div 100000$ км и ширину 4 000 - 15 000 км. Таким образом, это тонкий вертикальный слой, который в проекции на диск виден как тонкое темное волокно. Измерения магнитного поля волокон, сделанные на лимбе, показывают значения 2 – 30 Гс, в среднем 8 Гс.

По оптическим наблюдениям протуберанцы биполярных флоккульных площадок являются сложным комплексом горячих корональных аркад (излучающих с $T > 2MK$ в мягком рентгене в их вершинах, и линиях железа $FeIX$ в их основаниях с $T = 1.2MK$), радиальных стримеров внутренней короны (по наблюдениям в линии $FeIV$) и холодных

волокон (в линиях H_α). Дестабилизация волокон рассматривается как одна из основных причин возникновения солнечных вспышек ([114]).

2.2 Обзор наблюдательных данных и методика их обработки

Исследуемая область NOAA 9077 была вспышечно-продуктивной и произвела мощную вспышку ($X5.7/3B$), 14 июля 2000 г.с максимумом в 10:24 UT. Согласно данным обсерватории Huairou в H_α [157] в этот день над нейтральной линией в АО наблюдалось волокно треугольной формы. Это волокно видно также на изображениях обсерватории Ramey (Пуэрто-Рико) [120] начиная с 13 июля. Мы использовали данные SOHO MDI с интервалом 96 минут для изучения магнитной структуры АО на уровне фотосферы. Область имела $(\beta - \gamma - \delta)$ -конфигурацию, и самые сильные поля ($H > 2000 G$) южной полярности были расположены с северной стороны группы пятен, а поля северной полярности были расположены с южной стороны. В активной области происходили небольшие изменения значений магнитных полей на уровне 5-10%, но общая структура оставалась практически неизменной. В тот же период в микроволновом излучении области наблюдались значительные изменения в интенсивности (до 90%) и в спектре поляризации (инверсии), которые описаны ниже. Для исследования были использованы данные трех больших радиотелескопов микроволнового диапазона.

2.2.1 Данные РАТАН-600

В работе использовались данные наблюдений Солнца в режиме мониторинга на РАТАН-600 в антенной системе "Южный сектор с перископическим отражателем". Параметры антенны в этом режиме описаны в главе 1. Пример одномерного изображения ("скана") Солнца на длине волны $\lambda = 6.06$ см) в интенсивности $I = I(L) + I(R)$ и круговой поляризации $V = I(L) - I(R)$ показан на рис.2.1. NOAA 9077 была изолированной областью и на момент вспышки имела координаты N22° W07°. Излучение этой АО было доминирующим по сравнению с другими маленькими источниками, захваченными вертикальной диаграммой. Для калибровки сканов использовались данные обсерватории Нобейма (NoRP), которая публикует в Интернет (<ftp://solar.nro.nao.ac.jp/pub/norp/data/daily/>) ежедневные

данные по полному потоку от всего диска Солнца на 5 частотах. Для других промежуточных частот РАТАН-600 используется интерполяция кубическими сплайнами. Этот метод обеспечивает точность измерения потока лучше чем 10%.

На рис.2.2 показана динамика яркостной температуры на 3 длинах волн рабочего диапазона РАТАН-600 в период с 11 по 16 июля 2000г. Из рисунка видно, что яркость источника постепенно и сильно понижается (до 90%) на коротких волнах. В средней части диапазона источник уменьшается до 50%, а на более длинных (больше 8 см) волнах депрессия излучения относительно маленькая, если вообще существует. Круговая поляризация источника также обнаруживает поведение, необычное по сравнению с типичными спектрами пятенной компоненты локальных источников. На рис.2.3 представлены сканы АО 9077 в канале круговой поляризации на нескольких сантиметровых волнах в период 4 дней до вспышки. Вблизи волны 4.62 см можно видеть узкую полосу частот (5-10 %) с инверсией знака круговой поляризации. В целях экономии места на рисунке приведены только несколько характерных длин волн. На всех длинах волн вне отмеченной узкой инверсионной полосы источник имеет равномерный спектр. Следует обратить внимание, что узкополосная инверсия сохранялась в течение всего периода наблюдений перед вспышкой и после вспышки исчезла. 14 июля наблюдения были сделаны двумя часами раньше начала импульсной фазы вспышки. В этот день мы можем видеть некоторое восстановление равномерного спектра поляризации на длинах волн 4.32 см и 4.62 см. Кроме того, за два часа до вспышки также наметилось восстановление яркости источника на коротких волнах (см. волну 2.32 см рис.2.2,) -источник увеличился по сравнению с предыдущим днем.

На рис.2.4 смена знака поляризации на двух соседних длинах волн 4.08 см и 4.62 см показана в крупном масштабе, с наложением на фотосферную магнитограмму. Видно, что смена знака произошла в центре источника, над линией раздела фотосферных магнитных полей. Необходимо отметить, что микроволновое потемнение и инверсия знака поляризации связаны с активностью NOAA 9077 и имеют общую природу. Другая невспыхивающая АО, зарегистрированная в этот период на диске, демонстрировала типичный монотонный спектр круговой поляризации.

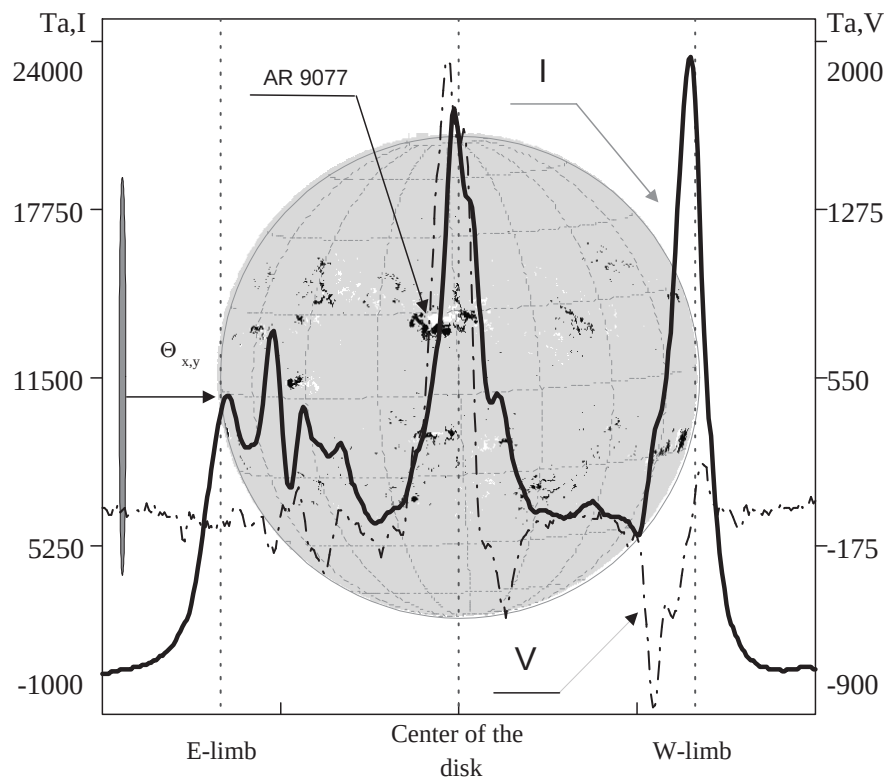


Рис. 2.1: Пример записи Солнца, полученной на ПАТАН-600 в интенсивности $I = I(L) + I(R)$ и круговой поляризации $V = I(L) - I(R)$ на волне 6.06 см 14 июля 2000 года, 9:00 UT. АО 9077 расположена в центре диска. Слева показаны размеры луча диаграммы на данной волне.

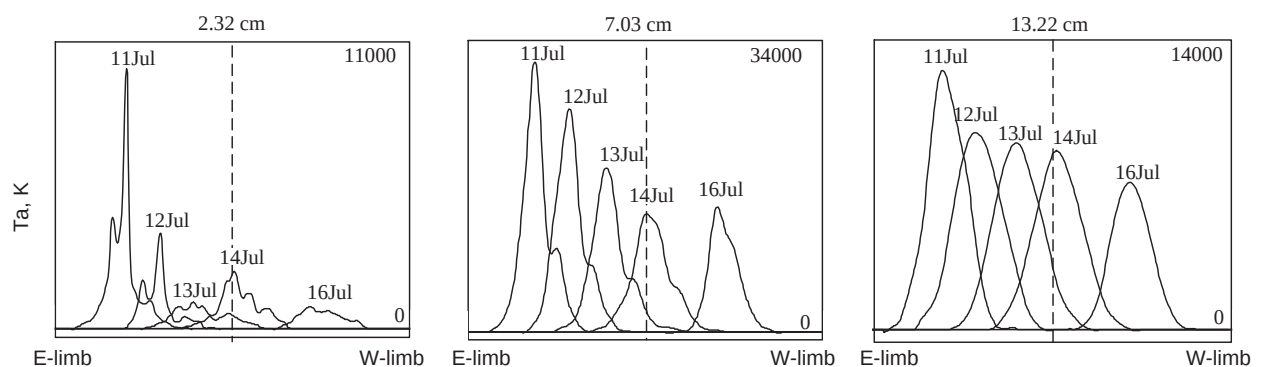


Рис. 2.2: Сканы интенсивности локального источника АО 9077 на длинах волн 2.32 см, 7.03 см и 13.22 см. Уровень спокойного Солнца вычтен. Видно "потемнение" радиояркосты АО с 11 июля по 14 июля, с уменьшением эффекта с длиной волны. Время наблюдения около 9:00 UT.

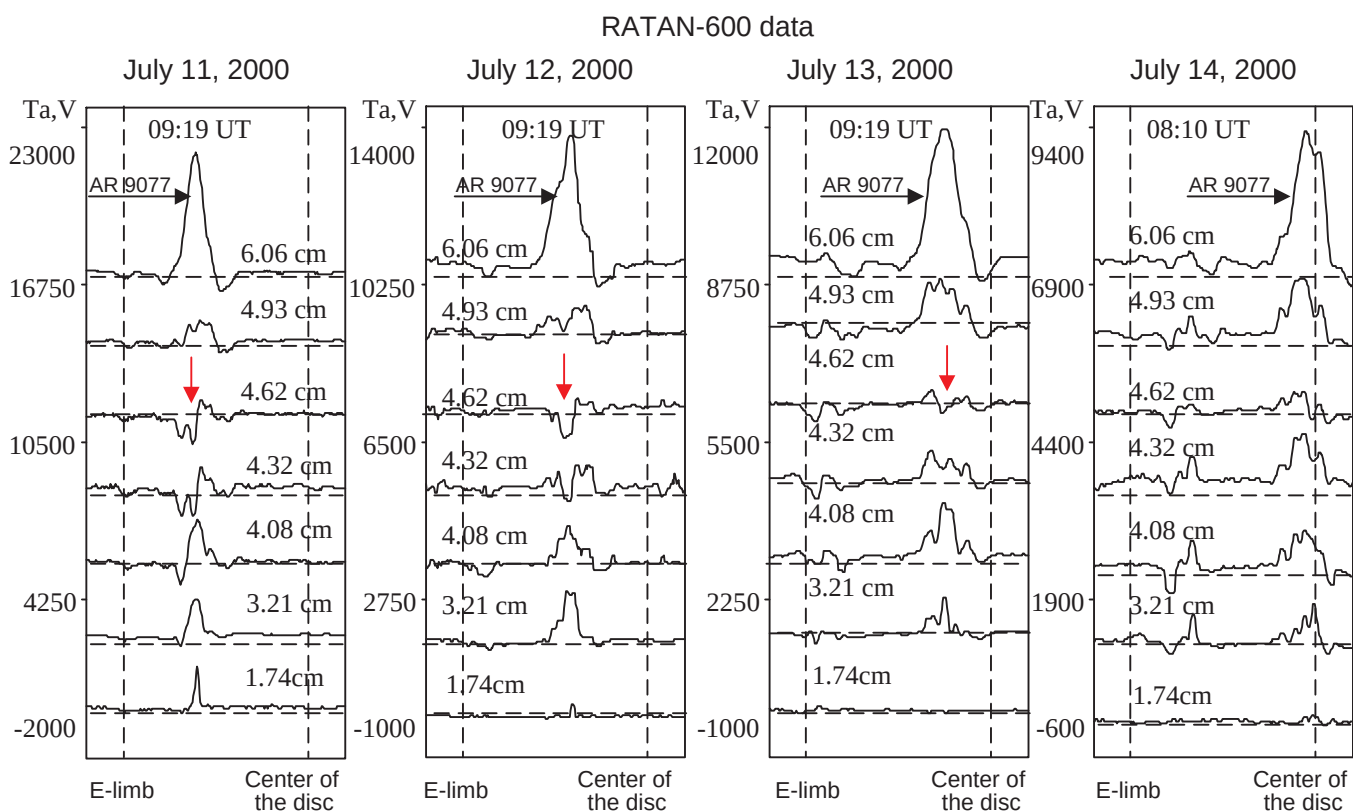


Рис. 2.3: Сканы круговой поляризации $V = I(L) - I(R)$ ЛЯ 9077 на нескольких длинах волн в диапазоне 1.74 см - 6.06 см в период с 11 июля по 14 июля. Можно видеть сложную реконструкцию в структуре АО на волнах 4.32 см и 4.62 см. Место инверсии поляризации отмечено стрелками.

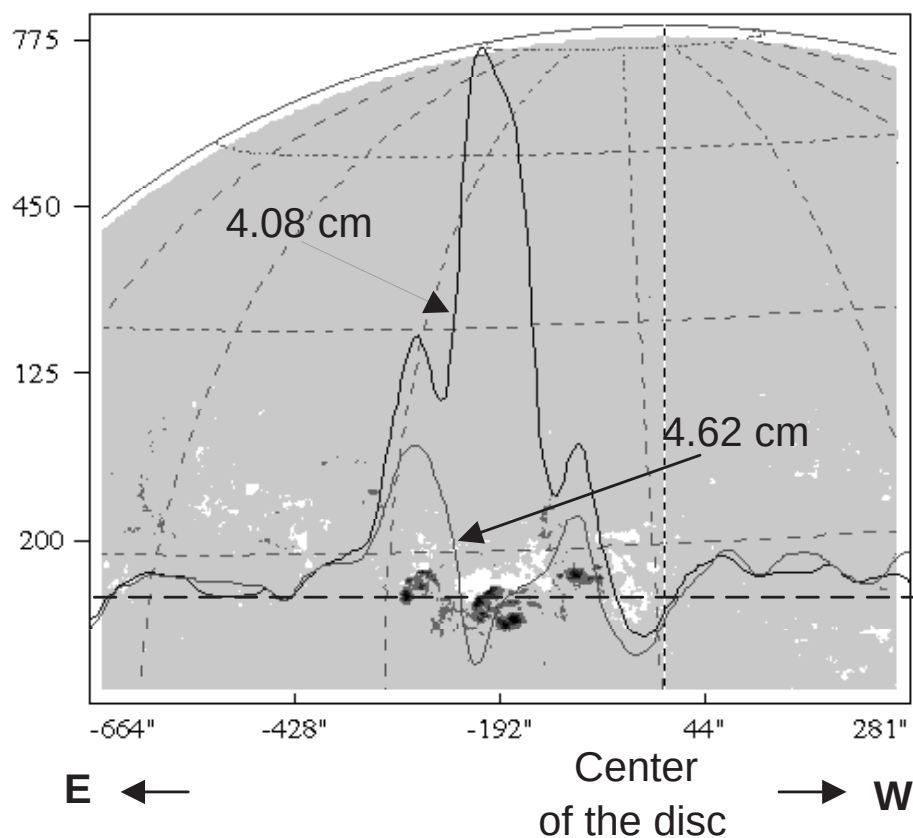


Рис. 2.4: Детальное сопоставление структуры источника в круговой поляризации на соседних длинах волн 4.08 и 4.62 см с магнитной структурой 13 июля 2000 г. Смена знака круговой поляризации произошла в центральной части АО, над линией раздела полярностей на фотосфере. Левая круговая поляризация направлена вверх, и правая направлена вниз.

2.2.2 Данные NRH

Поскольку в исследуемый период на РАТАН-600 наблюдения проводились только три раза в день, с промежутком между наблюдениями около одного часа, мы использовали для подтверждения достоверности наблюдаемого эффекта данные NRH на волне 1.76 см, публикуемые в Интернете по адресу:

ftp://solar.nro.nao.ac.jp/pub/norh/images/daily/2000/07/.

Для удобства детального сопоставления, двумерные изображения, полученные на Нобейма, были повернуты на позиционный угол Солнца Р, и свернуты с диаграммой РАТАН-600. Полученные одномерные сканы были откалиброваны по той же методике, которая использовалась для калибровки данных РАТАН-600. Рис. 2.5 показывает хорошее соответствие между данными РАТАН-600 и NRH, как в канале интенсивности, так и в круговой поляризации, несмотря на довольно большой (приблизительно 6.5 часов) разнос во времени наблюдений. На этой длине волны мы наблюдаем депрессию (до 90%) в течение 4 предвспышечных дней по данным обеих обсерваторий, как в интенсивности, так и в круговой поляризации.

2.2.3 Данные ССРТ

Также было проведено сопоставление данных РАТАН-600 с изображениями, полученными на ССРТ на волне 5.2 см, опубликованными в Интернете по адресу:

ftp://iszf.irk.ru/pub/ssrt_data/fits/2000/07/).

Карты ССРТ были преобразованы в одномерные сканы по той же методике, что и карты Нобейма. На рис.2.6 видно также хорошее соответствие данных РАТАН-600 и ССРТ в канале интенсивности в течение всего периода. Однако мы видим значительное различие в канале круговой поляризации для 13 июля. В этот день на ССРТ зарегистрировано понижение интенсивности излучения в центре источника вплоть до появления противоположного знака поляризации. Однако РАТАН-600 не отметил смены знака поляризации на самой близкой волне 4.93 см. Но смена знака в этот день зарегистрирована на более коротких волнах 4.62 см и 4.32 см (рис.2.4). Возможно, это различие обусловлено существенной разницей во времени в моментах наблюдений около 6 часов.

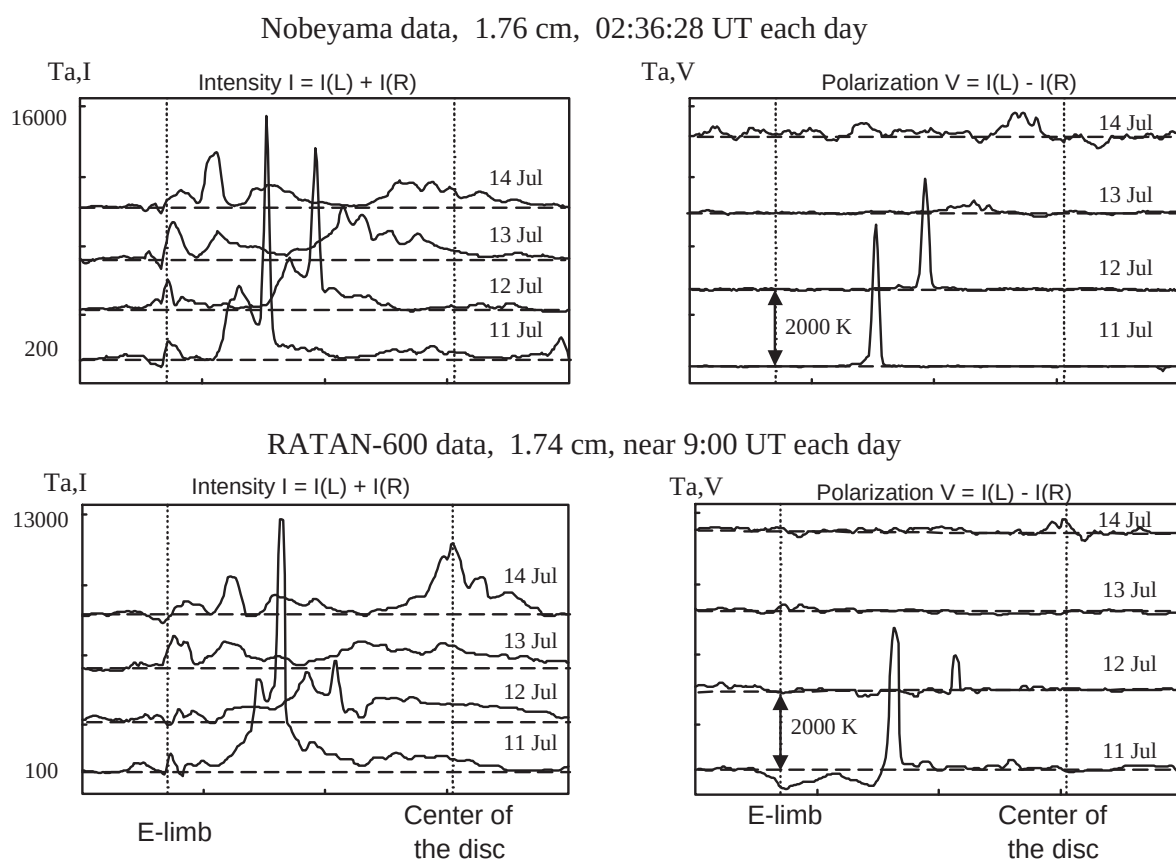


Рис. 2.5: Сопоставление данных Нобейма и РАТАН-600 на самых близких длинах волн в течение периода с 11 июля по 14 июля. NRH карты были свернуты с диаграммой направленности РАТАН-600. "Потемнение" АО9077 ото дня ко дню видно и в канале интенсивности (I) и в канале круговой поляризации (V).

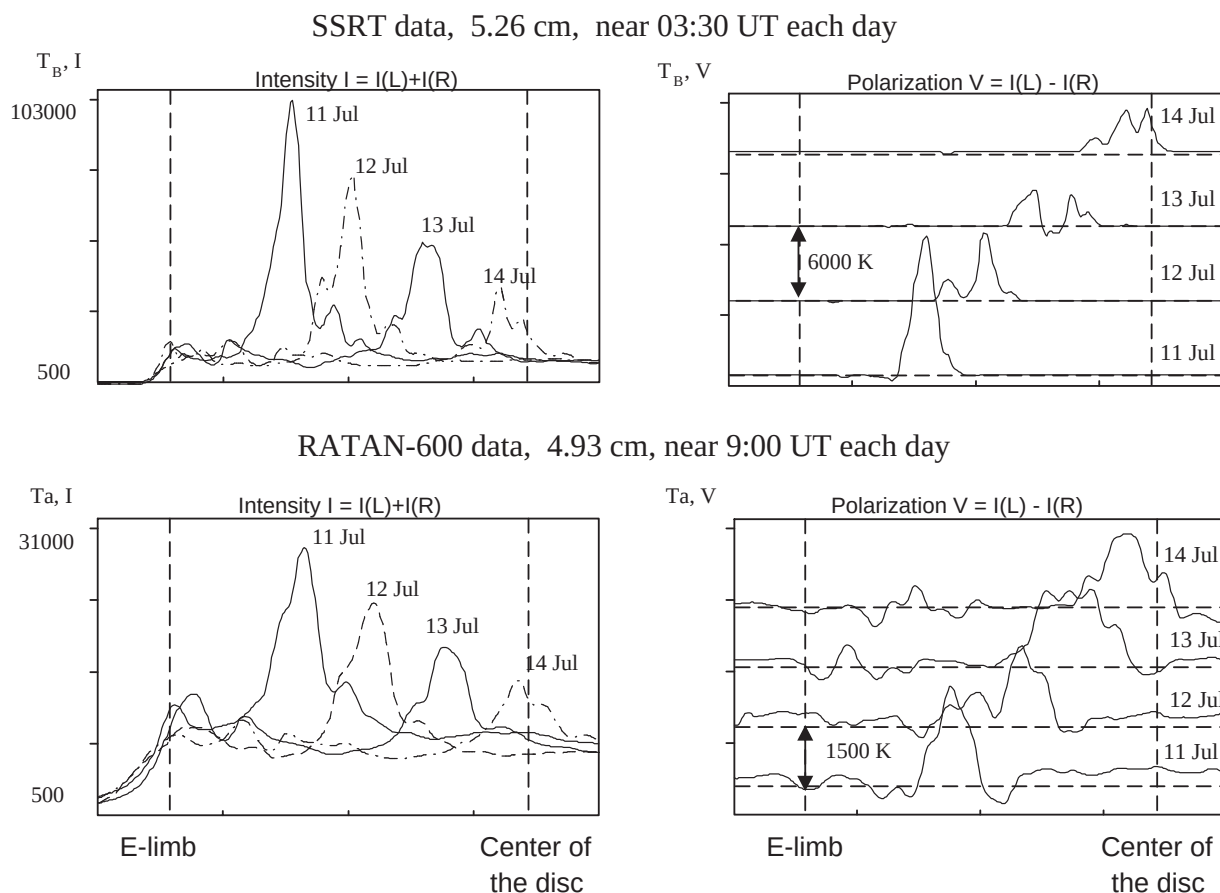


Рис. 2.6: Сопоставление данных ССРТ на волне 5.2 см и данных РАТАН-600 на самой близкой длине волны 4.93 см в период с 11 июля по 14 июля. Слева: интенсивность (I), справа: круговая поляризация (V). Данные РАТАН-600 представлены в шкале антенных температур. Здесь, для ясности, сканы за 12 и 13 июля изображены пунктирными линиями. Эффект потемнения хорошо виден в канале интенсивности. 13 июля на данных ССРТ видна инверсия знака круговой поляризации. Этот эффект на сканах РАТАН-600 виден на более коротких волнах 4.62 см и 4.32 см рис.(2.4).

2.2.4 Обсуждение результатов наблюдений

Наше обсуждение будет касаться главным образом рисунков 2.3, 2.5, 2.6 и 2.7. На рис.2.7 приведено сравнение фотосферных магнитных полей по данным SOHO MDI с картами круговой поляризации на радиоволнах, полученных на NRH (1.7 см) и ССРТ (5.2 см). Следует отметить, что структура фотосферных магнитных полей (верхний ряд) в предвспышечный период подвергалась не таким значительным изменениям, как структура круговой поляризации на радиоволнах (средний и нижний ряды). На более длинной волне 5.2 см 12 июля появился новый источник с правой круговой поляризацией (область белого цвета) внутри области с противоположным признаком. 13 июля излучение этого источника стало доминирующим в области, так что на одномерном скане мы видим падение излучения в центре локального источника вплоть до смены знака. Наложение карт ССРТ и SOHO MDI показывает, что этот источник был расположен над большим пятном северной полярности (черный цвет) на фотосфере (отмечено кружками на рис.2.7а и 2.7с). Область правой поляризации (белое пятно) расположена над пятном северной полярности, что противоположно знаку излучения необыкновенной моды на третьей гармонике гирочастоты. По-видимому, это излучение необыкновенной моды на второй гармонике гирочастоты. Такое же поведение поляризованного излучения, но на более коротких длинах волн (4.62 - 4.32 см), наблюдалось на РАТАН-600 (см. на рис.2.3 места, отмеченные стрелками). В этой узкой полосе частоте наблюдается преобладание о-моды в центральной части источника в течение 3-дневного предвспышечного периода.

2.3 Интерпретация наблюдаемых явлений

Вспышечно-продуктивные АО имеют сложную структуру магнитосферы не только на уровне фотосферы (дельта-конфигурация), но и на уровнях хромосферы и короны. Это уровни, на которых обычно начинается сценарий будущей вспышки. Волокна, расположенные на этих уровнях, часто рассматриваются как индикаторы нейтральной линии магнитного поля. Извержение волокон часто рассматривается как причина возникновения КВМ. В исследуемой нами активной области существовало большое волокно треугольной формы, которое начало двигаться пример-

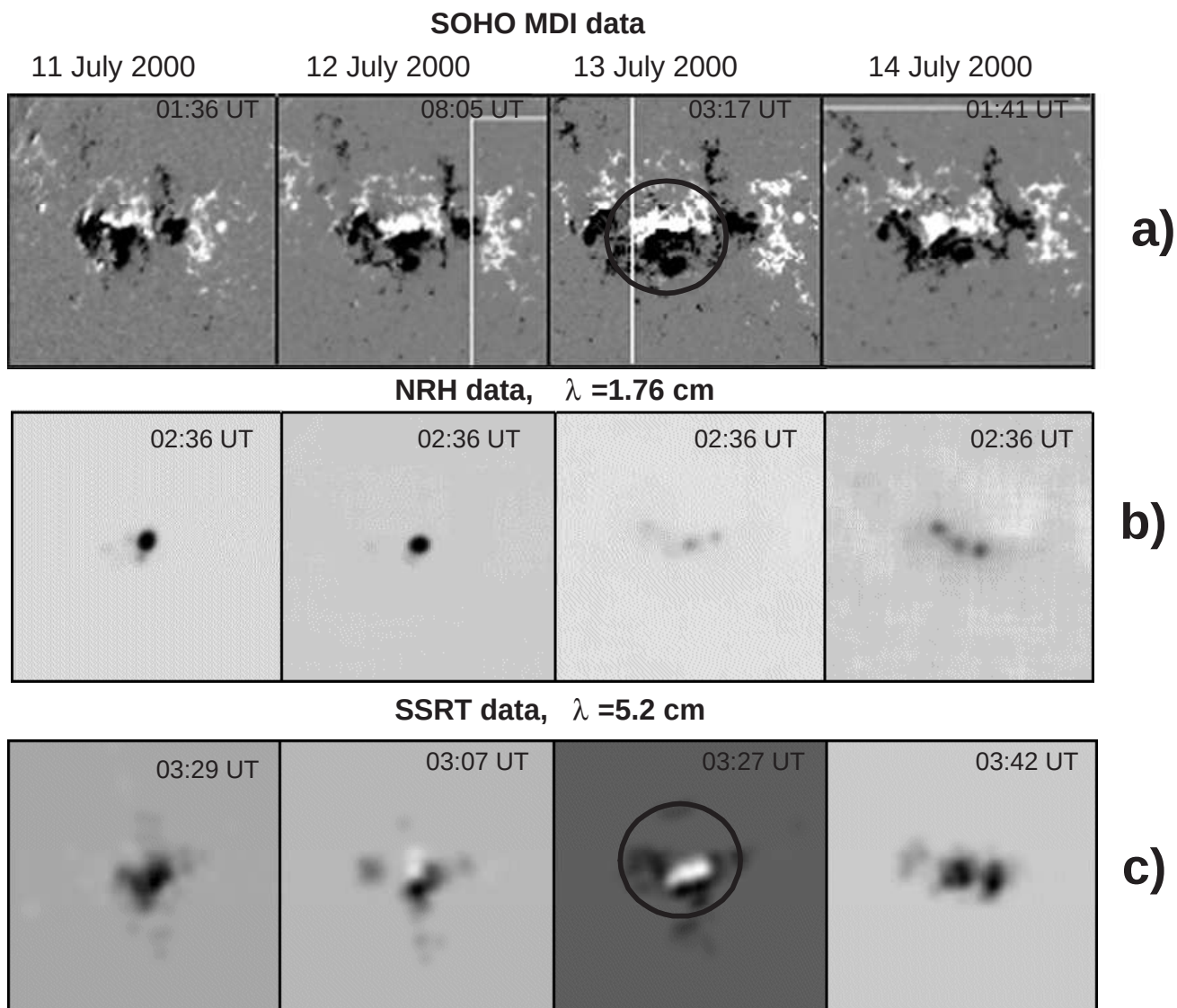


Рис. 2.7: Двумерные изображения активной области NOAA 9077. в период с 11 июля по 14 июля 2000г. Горизонтальный размер каждой картинке - около 480". Наверху (a): фотосферные магнитные поля, данные SOHO MDI. Посередине (b): карты круговой поляризации на 1.76 см, данные NRH. Внизу (c): карты круговой поляризации на волне 5.2 см, данные ССРТ (с). Видны значительные изменения структуры круговой поляризации на радиоволнах ото дня ко дню при практической неизменности структуры магнитных полей на фотосфере. Особенно сильное различие видно в данных 13 июля. В этот день знак круговой поляризации над магнитным полем северной полярности (область обведена кружком) изменился по сравнению с 11-12 июля. Также следует обратить внимание, что данные NRH демонстрируют сильное уменьшение потока поляризованного излучения в течение всего предвспышечного периода.

но за два часа до вспышки [157], и во время вспышки было выброшено в виде КВМ. Мы имеем два наблюдательных факта в радиодиапазоне в предвспышечный период: 1) широкодиапазонное (от 1.74 до 8 см) микроволновое потемнение и 2) узкополосная (5 – 15%) инверсия круговой поляризации в середине этого диапазона. Высокая степень круговой поляризации ($p > 30\%$) источника на коротких волнах свидетельствует о циклотронном механизме радиоизлучения с преобладанием необыкновенной волны ([162]). Это позволяет сделать оценку продольной компоненты магнитного поля $H = 2000G$ для длины волны 1.7 см, и $H = 700G$ для 5.2 см [43]. Известно, что для циклотронного излучения типичного источника пятенной компоненты характерен монотонный рост спектра с длиной волны в рассматриваемом нами микроволновом диапазоне. Но в случае активной области 9077 монотонность спектра нарушается, и в диапазоне длин волн около 4-5 см регистрируется двойная инверсия круговой поляризации. Согласно модельным вычислениям [164], такая двойная инверсия поляризации возможна при образовании холодного волокна в атмосфере над активной областью. Присутствие волокна приводит к локальной смене знака градиента кинетических температур. В обычных условиях в хромосфере градиент температур положительный, и преобладает излучение необыкновенной волны на третьей гармонике гирочастоты, которое идет с более высокого и более горячего слоя. Существование области с отрицательным температурным градиентом в некотором интервале высот ведет к преобладанию излучения с более низкого слоя, на второй гармонике гирочастоты. Так как эта гармоника излучает обыкновенную волну, в спектре появляется частотная область с инверсией знака поляризации. Нужно обратить внимание, что этот эффект узкополосной инверсии является долгоживущим явлением, и наблюдался как на РАТАН-600, так и на ССРТ. Наше представление о положении волокна в АО 9077 показано на рис.2.8.

Что касается микроволнового потемнения активной области в тот же период, в качестве первого приближения это явление можно объяснять поглощением в тепловой плазме волокна проходящего циклотронного излучения в соответствии с уравнением переноса :

$$T_B = T_s \exp(-\tau_p) + T_p(1 - \exp(-\tau_p)) \quad (2.1)$$

где T_B - наблюдаемая яркостная температура, T_s - температура ци-

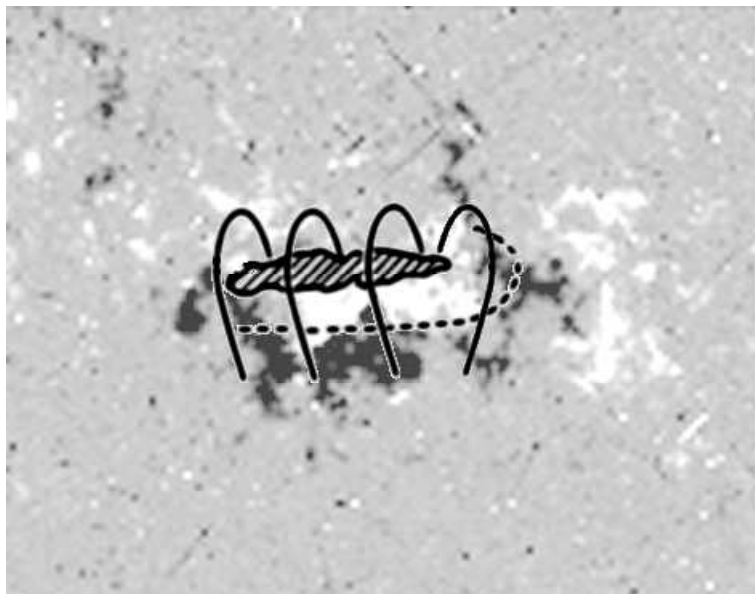


Рис. 2.8: Схематическое представление волокна, расположенного над нейтральной линией магнитного поля, и арочная структура магнитосферы в нижней короне.

клотронного источника, T_p и τ_p - температура и оптическая толщина волокна.

Принимая во внимание $T_s \gg T_p$, для случая $\tau_p < 1$, можно написать:

$$T_B \approx T_s \exp(-\tau_p)$$

Как видно из рис.2.2, самая слабая депрессия наблюдается на длинных волнах, и к коротким волнам ее интенсивность увеличивается. При предположении стабильности исходного циклотронного излучения мы оценивали изменение непрозрачности τ_p экранирующего слоя в виде волокна. В диапазоне длин волн от 1.7 см до 8 см получены значения $\tau_p = (0.5 \div 2)$. Такой метод, основанный на широких наблюдениях диапазона может быть очень чувствителен к небольшим изменениям непрозрачности вещества для проходящего излучения. Поэтому процесс формирования волокна по радиоданным отслеживается с 11 июля, в то время как в линии H_α волокно было зарегистрировано только начиная с 13 июля.

Вернемся теперь к радио наблюдениям, которые были получены за 2 часа перед вспышкой. Эти данные свидетельствуют о частичном восстановлении относительного вклада необыкновенной волны. По-видимому, мы наблюдаем начало процессов, связанных с движением волокна, которое впоследствии привело к мощной вспышке с КВМ. В пользу предположения о наблюдении волокна говорит еще тот факт, что волокна

вообще намного шире в радиодиапазоне и ультрафиолете ([83], [55]), чем на изображениях в H_α . Собственное излучение волокон в радиодиапазоне хорошо изучено другими авторами ([118], [83], [27]), которые определили тепловой механизм излучения волокон. Здесь мы представляем другое проявление существования волокна, в форме поглощения проходящего циклотронного излучения, генерируемого в нижележащих слоях атмосферы Солнца.

Также следует отметить, исходя из нашего предположения о природе наблюдаемого долговременного предвспышечного потемнения, что оно не имеет ничего общего с различными типами кратковременных потускнений (dimmings), которые иногда наблюдаются в рентгеновском и далеком ультрафиолетовом диапазонах за несколько (десятков) минут перед КВМ.

2.4 Выводы

Данное исследование способствует пониманию природы состояния активной области перед большими вспышками.

- Обнаружены два эффекта в микроволновом диапазоне в предвспышечный период:
 1. долговременное (в течение 4 дней) постепенное уменьшение интенсивности излучения ("потемнение") локального источника в диапазоне от 1.7 до 8 см, причем эффект увеличивается к коротким волнам;
 2. двойная узкополосная (5%) инверсия по спектру поляризации циклотронного излучения (от е- моды к о-моду и обратно) в центральной части сантиметрового диапазона (4 - 5 см).
- Эти эффекты хорошо объясняются моделью постепенного накопления холодной массы волокна, расположенного в атмосфере АО над нейтральной линией, и его выброса перед вспышкой.

Согласно результатам данного исследования, микроволновое потемнение в комбинации со спектральными неоднородностями поляризованного излучения может использоваться как долгосрочный признак предвспышечного состояния активной области.

Глава 3

Исследование предвспышечного излучения активных областей производящих мощные вспышки.

Анализ солнечных данных (см. <http://www.sel.noaa.gov/weekly/>) показывает, что на Солнце по-видимому существуют 3 класса различных по стабильности активных областей. Большое количество АО проходит по диску, не производя практически никаких вспышек за все время нахождения их на диске. Такие области имеют стабильную структуру магнитных полей на уровне фотосферы, и монотонные спектры потока интенсивности и потока поляризованного радиоизлучения в микроволновом диапазоне, с максимумом в диапазоне около 5 - 6 см ([18], [34], см. рис.3.1). Поведение этих спектров определяется совместным действием тепловых механизмов (тормозного излучения – *bremsstrahlung* и циклотронного излучения на первых 3-4 гармониках гирочастоты ([161], [4]). Циклотронное излучение, приходящее от активной области, имеет круговую поляризацию, соответствующую избытку излучения необыкновенной волны, а знак поляризации определяется полярностью магнитного поля доминирующего пятна.

Особый интерес представляют вспышечно-продуктивные активные области (ВПАО), отличающиеся переменностью излучения и большой вспышечной активностью. Исследование ВПАО, проведенное в данной работе, указывает на высокую информативность микроволновых спектрально-поляризационных наблюдений, которые, по-видимому, непосредственно детектируют плазму в местах первичного выделения энергии перед вспышкой. Обнаружено несколько новых проявлений в спектре поляризованного радиоизлучения ВПАО на временных интер-

валах от нескольких часов до нескольких дней, как до вспышки, так и во время вспышки. Мы также показываем, что эти новые эффекты связаны с генерацией мощных вспышек, и они могут быть использованы для проверки существующих моделей солнечной вспышки (см. обзоры [126], [98]) и для разработки более эффективных критериев прогноза по сравнению с существующими [136].

Подробно был проанализирован наблюдательный материал, полученный в регулярных наблюдениях на РАТАН-600 в период с 4 января по 28 октября 2001 г. за исключением небольших технических перерывов с 16 по 24 апреля и с 15 по 25 августа. Практически все ВПАО, присутствовавшие на диске в течение 10 месяцев, были зарегистрированы в спектральных наблюдениях их излучения в интенсивности (параметр Стокса $I=I(L)+I(R)$) и круговой поляризации (параметр Стокса $V=I(L)-I(R)$). Кроме того, в марте, апреле и сентябре проводились многоазимутальные наблюдения, которые позволили изучить динамические свойства ВПАО на микроволнах.

3.0.1 Эффект коротковолновой инверсии знака поляризации

На рис.3.1 (а и b) представлено одно из многоволновых наблюдений, выполненное 27 марта 2001г, в 8h50m UT. В этот день все зарегистрированные на диске активные области были стабильны и их спектры излучения в интенсивности (рис. 3.1a) и круговой поляризации (рис. 3.1b) имели монотонный рост с длиной волны, что типично для излучения стабильных циклотронных радио источников. Спектры поляризованного излучения некоторых активных областей, присутствовавших в этот день на диске, представлены на рис.3.1c. Все они демонстрируют рост с длиной волны на частотах от 15 ГГц и имеют широкий максимум в диапазоне 6-8 ГГц. Вблизи центра диска находилась активная область NOAA 9393 (см. рис. 3.1a и b). Она имела сложную структуру, состоящую из трех источников правой поляризации а), b) и c) и была вспышечно активной, хотя в течение 27 марта 2001 г. излучение этой области было стабильным. В дальнейшем эта АО резко активизировалась, что привело к появлению спектральных неоднородностей в поляризованном излучении (см. ниже).

На следующий день в активной области 9393 начались предвспышечные процессы, что было отмечено появлением инверсии круговой

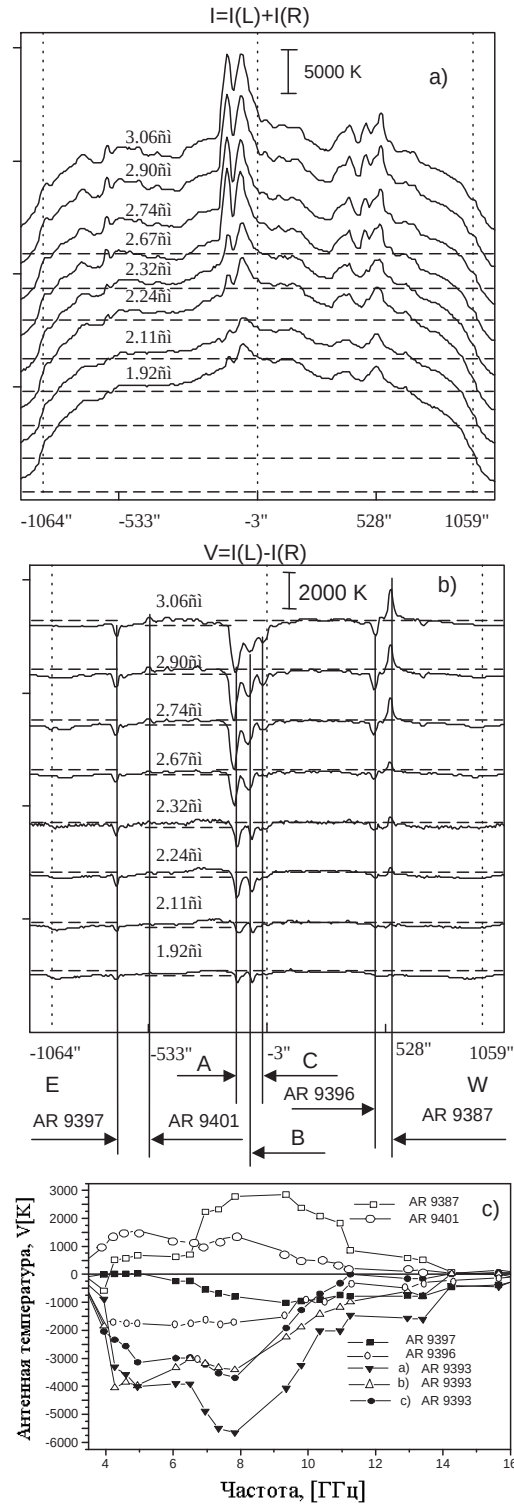


Рис. 3.1: (а) Сканы диска Солнца для 27 марта 2001 г, полученные с одномерной диаграммой РАТАН-600, на нескольких близких волнах сантиметрового диапазона. (а) - сканы интенсивности, сдвинутые по вертикали относительно друг друга для удобства сопоставления, (б)- сканы круговой поляризации, также сдвинутые по вертикали. На этом рисунке и далее на других левая поляризация имеет положительный знак, а правая отрицательный (см. также текст). (с)-спектры максимальных амплитуд поляризованных радиоисточников для активных областей, представленных на верхних рисунках.

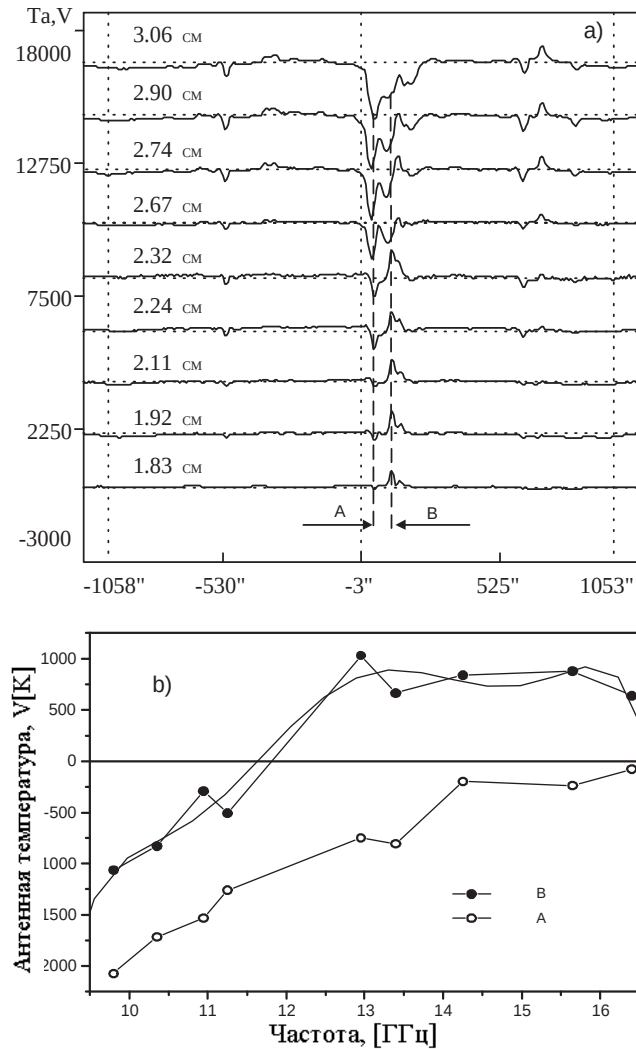


Рис. 3.2:

Наверху: сканы круговой поляризации Солнца на нескольких коротких волнах сантиметрового диапазона для 28 марта 2001 г, 8h46mUT. В западной части активной области AR9393 наблюдается рост источника А левой поляризации на волнах от 1.83 см до 2.32 см, что привело к эффекту коротковолновой инверсии. Внизу: Спектры восточного (В) и западного (А) источников в AR 9393. Источник В показывает инверсию знака на частоте близкой к 12ГГц. Пунктиром приведена кривая, усредненная степенным полиномом. Источник А имеет монотонный рост правой поляризации с длиной волны.

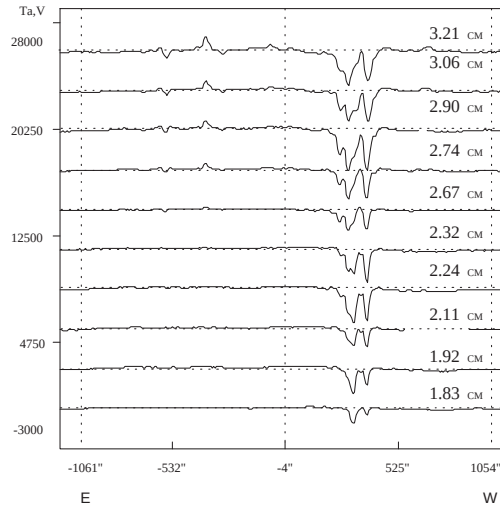


Рис. 3.3: Сканы поляризации в антенных температурах для 30 марта 2001 г, 10h14m UT. Активная область AR 9393 находится в западной части диска и вновь имеет стабильную структуру спектра.

поляризации на коротких волнах (1.83 см - 2.32 см) в ее западной части (см. рис.3.2а). На этом рисунке представлен в крупном масштабе многоволновый одномерный скан Солнца в поляризованном излучении, зарегистрированный 27 марта 2001 г. в 8h46m UT.

Активная область 9393 располагалась в этот день вблизи центра диска, и в ее структуре произошли существенные изменения. На рис.3.2а отмечены два основных источника - В в западной части и А в восточной части активной области. В излучении источника В была отмечена смена знака поляризации на волнах от 1.83 см до 2.32 см, тогда как структура и знак поляризации источника А сохранились (см. также рис.3.1b и 3.2b). Эта коротковолновая инверсия круговой поляризации (которую мы назвали А1-эффект) существовала вплоть до начала импульсной фазы мощной вспышки X1.7 в 10h15m 29 марта 2001 г.

Мы полагаем, что инверсия круговой поляризации указывает на подъем нового магнитного потока с полярностью, противоположной полярности вышележащего поля с величиной около 1400-2000 Гс в предположении циклотронного излучения на третьей гармонике гирочастоты, в соответствии с формулой $B[Gs] = 3570/\lambda[cm]$. При этом знак поляризации определен излучением необыкновенной волны и полярностью магнитного поля. Коротковолновая инверсия поляризации обычно сначала появляется на самой короткой волне 1.74 см, затем со временем

постепенно сдвигается в сторону более длинных волн 3-4 см. Необходимо отличать этот тип поляризационной инверсии от хорошо известного явления прохождения циклотронного излучения пятенного радиоисточника через область квази-поперечных (QT) магнитных полей ([25], [161], [116]). Как известно из наблюдений, инверсия в квази-поперечных магнитных полях обычно начинается на длинных волнах (в диапазоне 8-9 см) в стабильных активных областях, расположенных вблизи лимба, и со временем перемещается в сторону коротких волн. На следующий день в наблюдениях 30 марта 2001 г. в AR 9393 восстановилась стабильная структура (см. рис.3.3), аналогичная структуре 27 марта 2001 г. (см. рис.3.1).

3.0.2 Эффект коротковолнового уярчения поляризации

Другой часто встречающийся случай состоит в появлении эффекта уярчения на коротких сантиметровых волнах, пример которого приведен на рис.3.4а.

Здесь на примере активной области AR 9415 показано, что на коротких волнах наблюдается увеличение потока излучения круговой поляризации для западного источника этой группы. Мы назвали такой случай А2-эффектом. Мы полагаем, что этот эффект связан с восходом нового магнитного потока с полярностью, совпадающей по знаку с вышележащим магнитным полем. Спектр излучения демонстрирует рост в сторону коротких волн (см. рис. 3.4b).

Длительность существования А1 и А2-эффектов меняется в интервале от нескольких часов до нескольких дней. Максимальная полоса частот, в которой происходят оба эффекта, довольно широка и достигает одной октавы (от 1.7 см до 3.5 см). Типичные величины потоков поляризованного излучения находятся в пределах $0.05 \div 0.5 \text{ s.f.u.}$. А-эффекты часто наблюдаются в ВПАО (в 60% случаев).

3.0.3 Частотная область с многократными инверсиями в спектре поляризации радиоизлучения

Следующее проявление ВПАО, названное В-эффектом, регистрируется обычно в хорошо развитых активных областях, с длительной вспышечной активностью. Часто он образуется как результат развития во времени А1-эффекта. При этом инверсия поляризации перемещается в диапа-

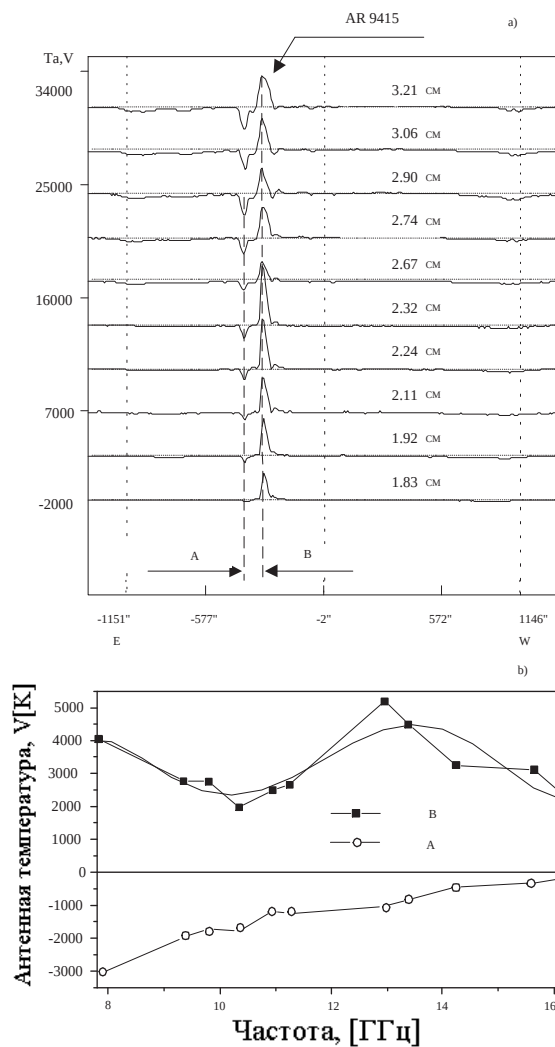


Рис. 3.4: (а) Сканы поляризованного излучения Солнца в антенных температурах для 8 апреля, 9h15mUT. Активная область AR 9415 расположена в восточной части диска Солнца, имеет биполярную поляризационную структуру в виде источников А и В. Заметно, что источник А имеет рост излучения на коротких волнах, тогда как источник В такой зависимости не показывает. (б) Спектры западного А и восточного В источников в AR 9415. Источник В имеет монотонный рост правой поляризации, источник А левой поляризации показывает рост спектра на коротких волнах. Пунктиром показана кривая усреднения степенным полиномом.

зон более длинных волн, а на коротких волнах вновь появляется поляризованное излучение с первоначальным знаком поляризации. Область В-эффекта характеризуется уменьшением потока поляризованного излучения в узкой частотной полосе частот (20-30%) в диапазоне 2-5 см. Степень поляризации соответственно падает с 10-15% вне полосы до долей процента внутри нее. Кроме того, в этой области появляются узкие точечные источники с резкими наклонами спектра и многократными инверсиями поляризации по частоте. На рис.3.5 на примере активной области 9393 представлено образование В-эффекта на волнах $2.67 \div 3.21$ см, которые приведены в крупном масштабе в правой части рисунка. Внутри ограниченной полосы на соседних волнах видно появление новых (точечных) источников с неоднократными сменами знака поляризации. Эта полоса часто смещается в сторону длинных волн непосредственно перед самой вспышкой. В данном случае, мощная вспышка уровня X20 произошла 2 апреля в 3h 25m UT.

Мы полагаем, что область В-эффекта отражает процессы, происходящие в области взаимодействия обыкновенной и необыкновенной мод, поскольку здесь часто наблюдаются инверсии поляризации, как по частоте, так и по времени (см. также рис.3.6).

Многочисленные спектральные и временные инверсии круговой поляризации в ВПАО

Исследование ряда ВПАО показало, что эффект смены знака поляризации часто присутствует в их микроволновом излучении и, по-видимому, является характерным свойством вспышечно-продуктивных АО, и подлежит дальнейшему изучению. Смена знака часто появляется в спектре поляризации перед мощной фазой вспышки, а также может существовать во время самой вспышки. На рис.3.6 представлены наблюдения AR 9393, проведенные 5 апреля в 9h 08m UT непосредственно перед включением основной фазы лимбовой вспышки M8.4 в 9h22m UT). Видны 4 инверсии знака поляризации по частоте, отмеченные стрелками справа.

Благодаря многоазимутальным наблюдениям, мы зарегистрировали также быстрые временные изменения поляризационной структуры в диапазоне от 2 см до 8 см с интервалом времени между сканами 8 минут на протяжении 4 часов. На рис.3.7 представлены наблюдения ВПАО AR 9415 для 14 апреля 2001 г. в 9h54m UT в каналах интенсивности и поляризации на 13 длинах волн. Видно, что в диапазоне 2.67 - 3.21 см

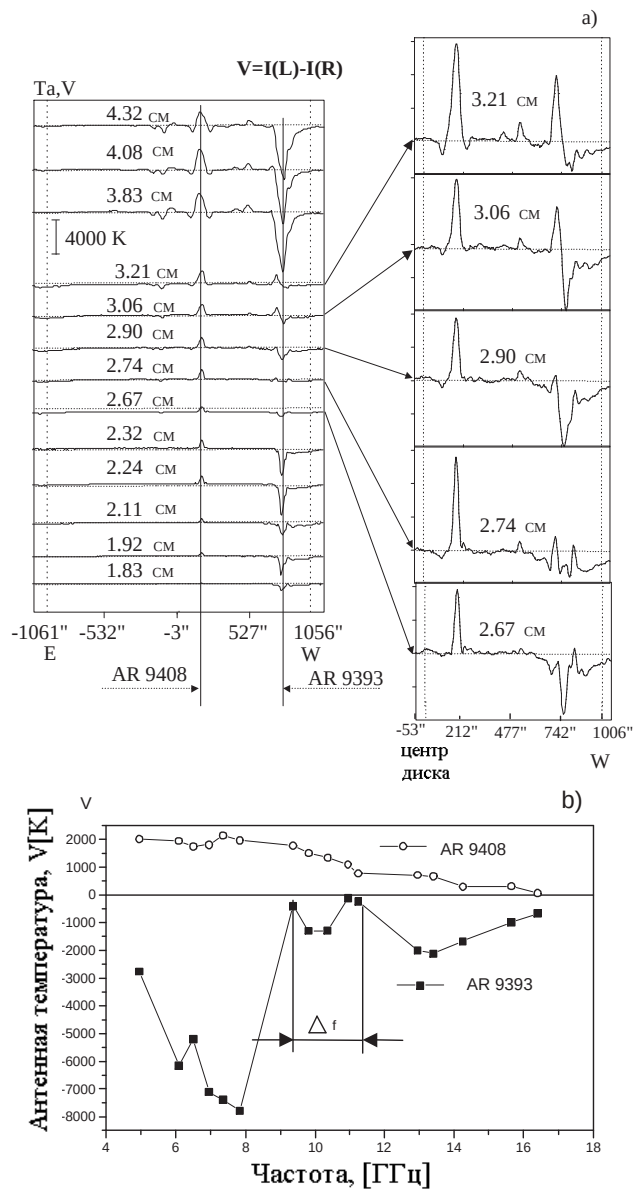


Рис. 3.5: (а) Сканы поляризованного излучения Солнца для 1 апреля 9h17mUT. Активная область AR 9393 расположена в западной части диска Солнца, имеет простую поляризационную структуру на коротких (2.32 см и короче) и на длинных волнах (3.83 см и длиннее). Справа в крупном масштабе представлены два локальных источника в диапазоне волн от 2.67 см до 3.21 см. ВПАО AR9393 в этом диапазоне демонстрирует сложную структуру с появлением узких точечных источников, с резкими наклонами спектра, многократными инверсиями поляризации и низкой степенью поляризации. (б) Спектры круговой поляризации для стабильной активной области AR 9408 и ВПАО AR9393. Здесь, Δf - ширина полосы частот, в которой происходят резкие изменения на слабом уровне поляризованного сигнала.

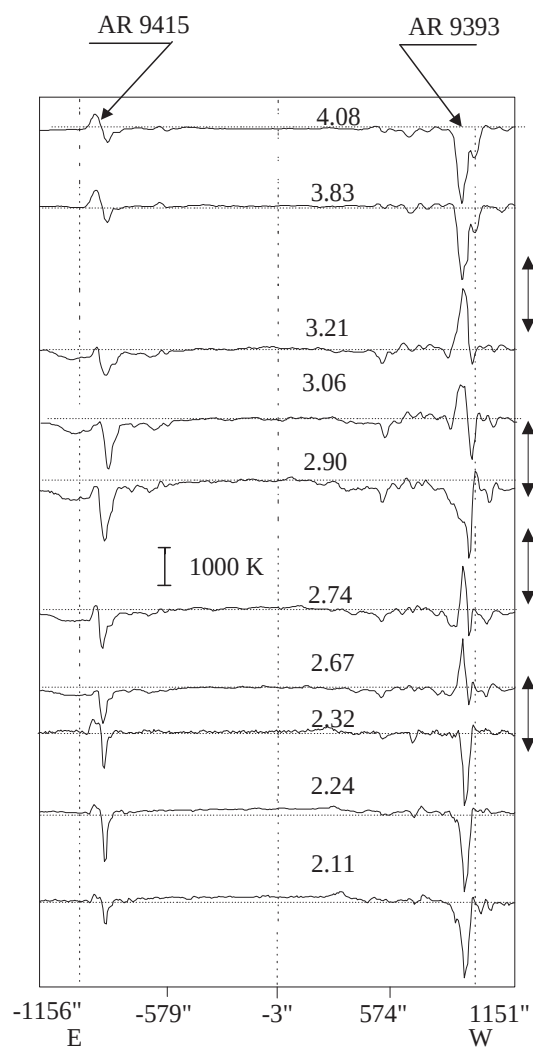


Рис. 3.6: Многоволновые сканы в каналах поляризации в 9h08m. Справа стрелками указаны места частотных инверсий поляризации, происходивших в активной области AR 9393 перед вспышкой M8.4.

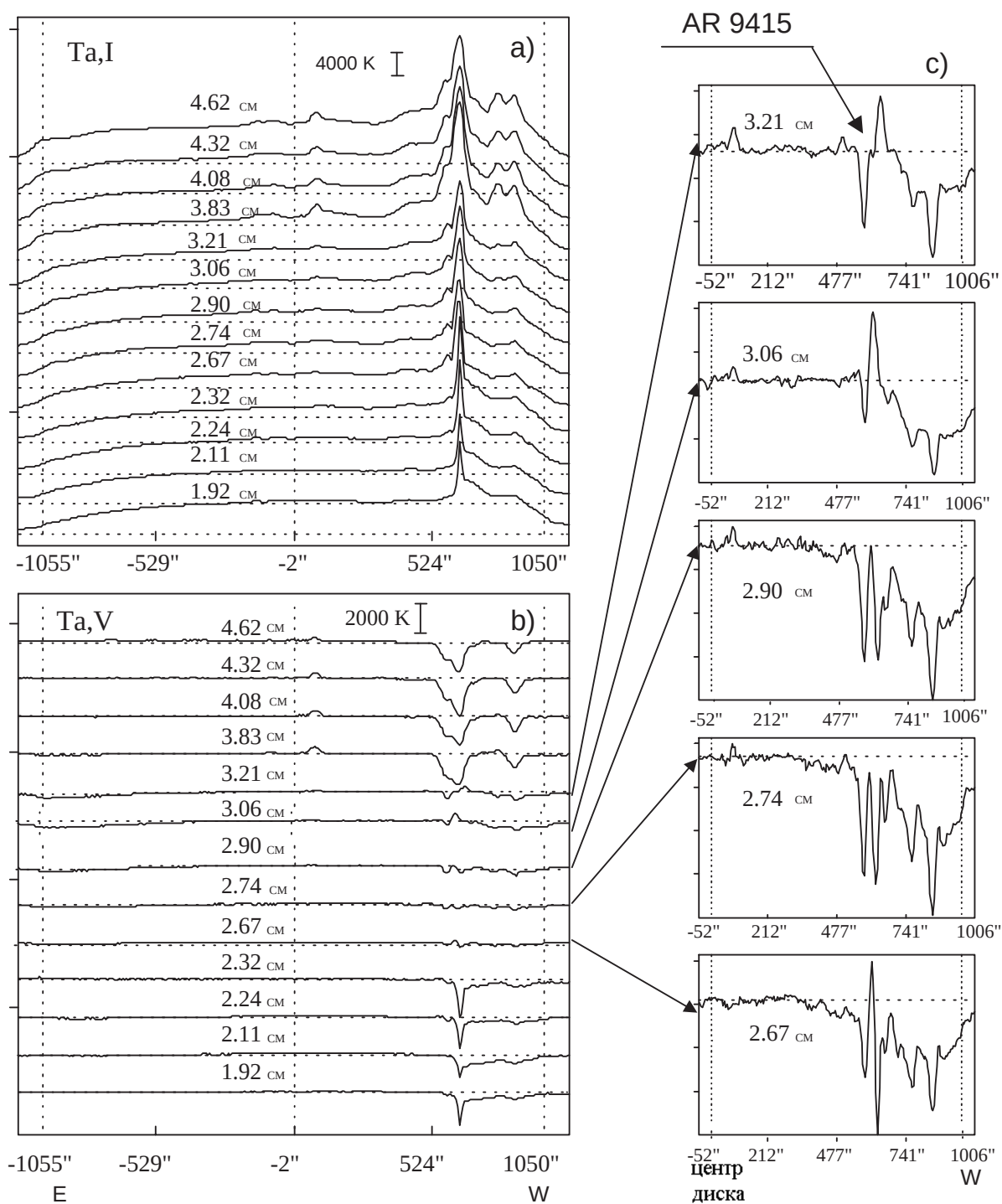


Рис. 3.7: Пример наблюдений 14 апреля 2001 г. ВПАО AR 9415 находилась в западной части диска. Здесь: а) Сканы Солнца в интенсивности, б) тоже в круговой поляризации, с) сканы западной части диска в крупном масштабе в диапазоне 2.67 см - 3.21 см. Заметим, что поляризационная структура AR 9415 в этом диапазоне резко отличается от коротких и длинных волн, образуя так называемую "частотную область взаимодействия мод".

степень поляризации резко уменьшена, в связи с чем этот диапазон приведен в правой части рисунка AR 9415 в крупном масштабе. Интересно отметить появление в этом диапазоне точечных поляризованных радиоисточников с резкими изменениями по спектру, вплоть до смен знака.

Для анализа временных изменений характеристик ВПАО AR 9415 были отобраны две волны, представленные на рис.3.8. Одна из них, $\lambda_1=2.90$ см была взята из области взаимодействия мод, другая $\lambda_2=3.83$ см из длинноволнового диапазона вне ее. На этом рисунке приведены 22 скана для обеих волн с интервалом времени 8 минут. Для сопоставления с другими активными областями проведены вертикальные линии. Видно, что структура AR 9415 на волне $\lambda_1=2.90$ см состоит из различных узких поляризованных радиоисточников с частыми сменами знака поляризации во времени. С другой стороны, на волне $\lambda_2=3.83$ см происходят лишь плавные изменения амплитуды поляризованного сигнала.

3.0.4 Результаты статистического исследования

Было проведено статистическое исследование связи ВПАО с обнаруженными особенностями в микроволновом излучении, и с продуктивностью мощных вспышек. Для анализа был выбран период с января по октябрь 2001 г. В этом году на РАТАН-600 ежедневно проводилось три наблюдения в день в разных азимутах. Вспышечная активность в анализируемый период времени представлена в Табл.1. Здесь перечислены все ВПАО, произведшие наиболее мощные вспышки. Столбцы 3 и 4 характеризуют активность в рентгене, а 5 и 6 - в оптическом диапазоне.

Перечисленные в Табл.1 мощные ВПАО имели вышеописанные особенности в спектре поляризованного излучения. Экспериментально установлено, что к этой группе можно отнести все активные области, которые произвели не менее трех мощных вспышек балла М и выше. Исключение составили лишь две области AR 9488 и AR 9636, произведшие только по две мощные вспышки. Другое исключение представлено активной областью 9658, которая произвела 16 вспышек в рентгене, из них 4 балла М, но мы не нашли особенностей в спектре ее круговой поляризации.

Результаты статистического анализа приведены в Табл.2. Из таблицы видно, что практически вся активность периода с 4.01.2001 по 28.10.2001 была обусловлена активностью ВПАО, составляющих лишь

5.9% от всего количества активных областей на Солнце. ВПАО произвели 83.3 % мощных вспышек, обычно генерирующих протоны высоких скоростей. Из 24 ВПАО только одна область не обладала особенностями в спектре поляризации. Такой высокий коэффициент корреляции указывает на возможно высокую прогностическую ценность обнаруженных эффектов.

3.0.5 Обсуждение результатов

Настоящая работа подчеркивает важность радионаблюдений для изучения природы мощной вспышечной активности ввиду их высокой чувствительности к измерению поляризации излучения, что является основным предметом обсуждения.

Следует различать активные области по их стабильности излучения: стабильные, квази-стабильные и ВПАО. По-видимому, все три типа активных областей различаются между собой по распределению параметров плазмы по высоте.

Стабильные активные области не производят вспышек совсем, и их количество составляет большую часть от всех областей. Такие АО имеют стабильную магнитосферу, и структура магнитного поля для них может быть рассчитана в потенциальном приближении от фотосферного уровня в корону. В этих активных областях нет существенных процессов выделения энергии и доминирующим является условие $E \leq H^2/8\pi$, где $E = n_e k T_e$ - кинетическая энергия электронов, H - магнитное поле.

Квази-стабильные активные области производят несколько вспышек малой и средней мощности (с рентгеновским баллом А, В или С) и иногда 1-2 вспышки балла М. В целом они сохраняют стабильную магнитосферу, но в них уже могут создаваться условия с коротким по длительности выделением энергии в виде вспышек среднего уровня.

Вспышечно-продуктивные активные области (ВПАО) обычно генерируют не менее 3 мощных вспышек балла М и выше, и множество вспышек баллов А, В или С. Активные области типа ВПАО являются принципиально нестабильными. Процессы высвобождения и накопления энергии в этих областях идут непрерывно и здесь действует условие $E \geq H^2/8\pi$. Магнитосферы таких областей нестабильны, не имеют упорядоченной структуры и не могут быть рассчитаны как экстраполяция потенциального магнитного поля от фотосферы в корону. Такое

представление объясняет короткую предвспышечную фазу 20-30 мин в квази-стабильных активных областях [76] и длительную подготовительную фазу на протяжении нескольких часов и дней в ВПАО. Резкие смены знака поляризации (см. рис.3.7 и рис.3.8) в течение длительного времени говорят о непрерывно длящемся вспышечном процессе с выделением энергии на малом уровне. Этот процесс накапливает энергию в магнитосфере активной области и в дальнейшем начинается процесс триггерного включения механизма высвобождения энергии.

Приведенные в работе наблюдательные данные свидетельствуют о новом понимании явления мощных солнечных вспышек, как процессов с длительной подготовительной фазой. В этой фазе происходит энерговыделение на слабом уровне и ее аккумуляция в магнитосфере активной области. Этот процесс идет до достижения уровня неустойчивости. Дальнейший сценарий главной фазы вспышки хорошо разработан ([110], [56], [126] [158] и др.). В соответствии с данными РАТАН-600 в диапазоне 2-5 см, подготовительная фаза может иметь несколько разновидностей в спектрах поляризованного излучения ВПАО.

Две из них мы трактуем как появление нового магнитного потока среди структуры старого вышележащего магнитного поля активной области. Новый магнитный поток может иметь полярность, совпадающую с доминирующей полярностью магнитного поля, и, в этом случае спектры поляризации демонстрируют уярчение в сторону коротких волн (рис.3.4b). В случае восхода нового магнитного потока с полярностью, противоположной старому магнитному полю, наблюдается эффект коротковолновой инверсии поляризации (рис.3.2b). Оба этих эффекта происходят во ВПАО часто за несколько часов и дней и тем самым отличаются от так называемой пред-вспышечной фазы, которая обычно имеет длительность несколько минут, редко десятки минут [76]. По-видимому, магнитные петли нового магнитного потока взаимодействуют с петлями старого магнитного поля в виде процесса перезамыкания по сценарию [54]. Однако, здесь этот процесс выполняет роль предварительного нагрева, который аккумулируется в магнитосфере активной области до такого уровня, при котором магнитная структура становится неустойчивой, в результате чего возникают триггерные процессы мощного выделения энергии и выброса корональных масс (см. обзор [126]).

Другое проявление длительной предварительной фазы, обнаруженное в радионаблюдениях, это образование частотно-ограниченной обла-

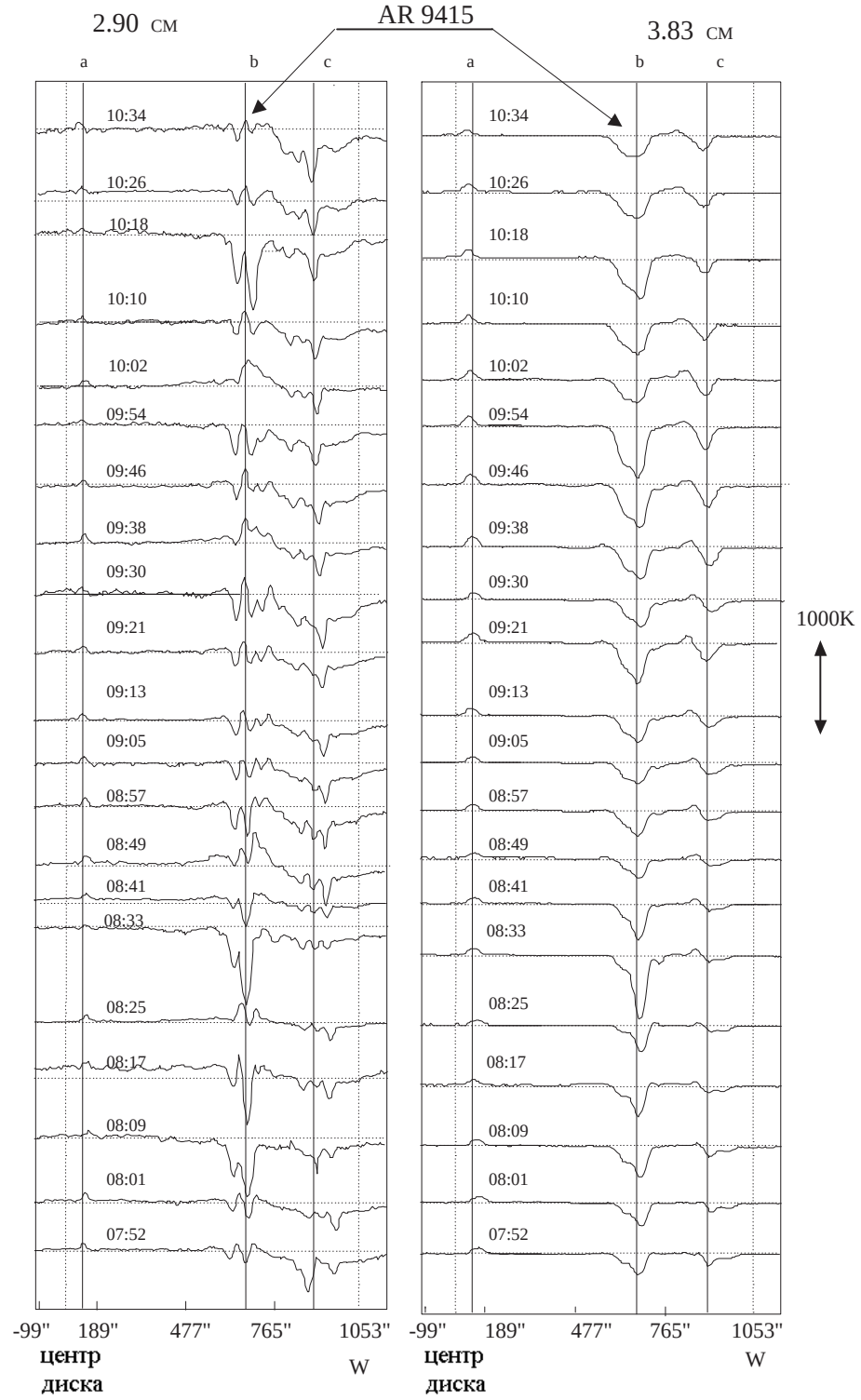


Рис. 3.8: Пример динамического поведения поляризации ВПАО AR 9415 на двух длинах волн, расположенных внутри и вне области взаимодействия мод. Наблюдения проводились с 7h52m по 10h34m UT с 8 минутным интервалом между сканами.

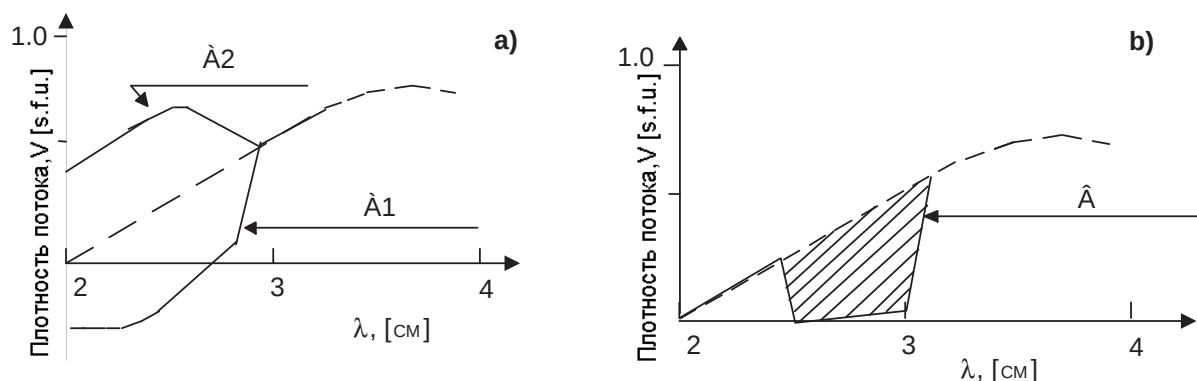


Рис. 3.9: (а) Сопоставление спектра стабильной АО с доминирующим циклотронным радиоисточником со спектрами для ВПАО с А1, А2 эффектами. б) Тоже, но в сравнении с эффектом В.

сти взаимодействия о- и х-мод. Основанием для такого названия являются резкие изменения в поляризационной структуре в частотной полосе 20-25%, в которой степень поляризации падает до долей процента и в которой наблюдается образование точечных поляризованных радиоисточников с инверсиями знака (см. рис. 3.5а,б, 3.7, 3.9а). По-видимому, здесь мы также имеем дело с выделением энергии на слабом уровне, происходящим в более высоких слоях нижней короны. Многократные инверсии знака поляризации, как по частоте, так и по времени, указывают на то, что предварительная фаза может происходить в виде длительных низко-энергичных минивспышек. Результатом действия таких длительных минивспышек также является накопление энергии в магнитосфере, достижение порога неустойчивости и включение процесса основной фазы мощной вспышки.

На основе данных, полученных в течение 2001 г., мы построили обобщенные спектры для А и В-эффектов (см.рис.3.9 а,б).

Каковы механизмы обнаруженных спектрально-поляризационных свойств микроволнового радиоизлучения (В-эффект) на предварительной фазе мощных вспышек? Обсуждение этих вопросов выходит за рамки размеров данной работы. Здесь мы лишь перечислим основные свойства этого эффекта:

1. Частотные инверсии происходят в диапазоне длин волн 2-5 см. Это указывает на связь с магнитотормозным механизмом на первых 3-4 гармониках гирочастоты.

2. Резкое уменьшение поляризованного потока в области взаимодействия мод до значений 0.05-10 s.f.u. и падение степени круговой поляризации до 0.3-1%. По-видимому, нужно привлекать объяснения о наличии токовых слоев в магнитосфере ВПАО.
3. Смены знака поляризации на предварительной фазе вспышки происходят с интервалом 8 минут и, может быть, короче.
4. Многократные инверсии знака поляризации по частоте. Это указывает на сильную вертикальную неоднородность магнитного поля на предварительной фазе и во время вспышки.

Из возможных интерпретаций наиболее вероятными являются процессы магнитного перезамыкания. С другой стороны, нельзя исключить, что частотная область появляется как результат турбулентности многоарочной магнитной структуры или множества токовых слоев на пути прохождения радиоволн к Земле [163]. Следует также упомянуть модель [164], которая объясняет инверсию поляризации, как результат появления о-моды в холодной плазме протуберанца расположенного над горячим радиоисточником. Однако эта модель не учитывает турбулентность холодной и горячей плазмы.

3.1 Выводы

1. На основе спектрально-поляризационных наблюдений на радиотелескопе РАТАН-600 получен новый наблюдательный результат о свойствах магнитосфер вспышечно-продуктивных активных областей в их поляризованном излучении.
2. Получены данные о существовании длительной подготовительной фазы в генерации мощных вспышек, которая проявляется в детальных спектрах поляризации в широком диапазоне микроволн.
3. Введено понятие ВПАО как вспышечно-продуктивных активных областей с длительным процессом выделения энергии на подготовительной фазе, накоплением энергии и ее взрывного энерговыделения во время основной фазы.
4. Приведен статистический материал, показывающий особую роль ВПАО в общей активности Солнца.

5. Показана необходимость крупных инструментов в исследовании ВПАО как на стадии изучения физических процессов, так и на стадии разработки критериев прогноза мощных вспышек.

Спектрально- поляризационные радионаблюдения вследствие их высокой чувствительности к процессам, идущим на уровнях нижней короны, где собственно и происходит первичное энергосвыделение, могут быть основой для разработки методик прогнозирования мощных вспышечных событий, часто идущих с выделением большого количества высокоэнергичных протонов.

Таблица 3.1: Перечень ВПАО в период с января по октябрь 2001 г.

NN	Номер активной области по классификации NOAA	Число вспышек в рентгене с баллом М и Х	Общее число вспышек в рентгене	Число вспышек в оптике уровня S	Число вспышек в оптике с уровнем >S
1	2	3	4	5	6
1	9313	4M	10	15	4
2	9368	3M	10	11	4
3	9373	4M	19	36	1
4	9393	24M, 3X	55	12	3
5	9401	5M	12	29	5
6	9415	6M, 5X	26	34	9
7	9433	15M	60	83	4
8	9455	5M	25	28	5
9	9488	2M	13	18	5
10	9502	3M	6	7	3
11	9511	4M, 1X	18	24	5
12	9557	3M	26	36	2
13	9591	9M, 1X	59	80	8
14	9600	3M	11	8	4
15	9601	10M	33	56	9
16	9608	12M	38	37	10
17	9616	5M	14	23	6
18	9628	7M	31	81	5
19	9632	2M, 1X	12	34	1
20	9636	2M	11	36	2
21	9658	4M	16	30	3
22	9661	1M, 2X	19	37	5
23	9672	4M, 2X	22	28	5
24	9682	9M	40	61	1

Таблица 3.2: Результаты статистического анализа периода с января по октябрь 2001 г.

Число всех активных областей на Солнце в период с 4.01 по-28.10.2001	406	100%
Число ВПАО, производших 3 и более вспышек с рентгеновским баллом М и Х	24	5.9%
Число всех мощных вспышек рентгеновского балла М и Х	192	100%
Число мощных вспышек от ВПАО	160	83,3 %
Число мощных вспышек от ВПАО с эффектами в спектрах поляризации на микроволнах	156	81,2%

Заключение

Основные результаты диссертации можно сформулировать следующим образом:

1. Разработан и внедрен в регулярную практику режим многократных азимутальных наблюдений на Южном секторе РАТАН-600 с Перископическим отражателем. Достигнуты параметры: длительность наблюдений Солнца в течение 4 - 4.5 часов с интервалом между сканами до 4 минут. Данный режим наблюдений расширяет возможности наблюдений на РАТАН-600 по изучению временных вариаций различных образований на Солнце и их двумерного картографирования одновременно на 15 длинах волн в диапазоне от 2 до 10 см.
2. Разработан и внедрен в наблюдательную практику комплекс вычислительных программ по многоволновому картографированию. В пакете реализована методика восстановления двумерных изображений по одномерным проекциям (сканы). Синтез изображений и чистка (используется метод CLEAN) производятся в пространстве сигналов. Пакет программ для картографирования написан на языке IDL, широко используемом для обработки солнечных наблюдений во всем мире. Программа для счета диаграмм направленности РАТАН-600 написана на C++, имеет оконный интерфейс, проста для использования и облегчает счет диаграмм при проведении большого количества наблюдений.
3. Разработано и внедрено в практику наблюдений Солнца на РАТАН-600 программное обеспечение для многоволнового анализа переменности различных объектов на Солнце и для сопоставления с данными других наземных и спутниковых обсерваторий. Программы написаны на языке IDL и основаны на использовании FITS формата, который в настоящее время является стандартом для хранения астрономических данных.

4. Обнаружен эффект предвспышечного микроволнового потемнения, который сопровождается узкополосной (5%) инверсией знака поляризации в средней части диапазона. Эффект наблюдался в диапазоне от 1.74 до 8 см в течение 3 дней перед вспышкой, в течение которых наиболее интенсивное падение излучения происходило на коротких волнах (до 90% на волне 1.74 см), с уменьшением эффекта к более длинным волнам (до 50% на волне 5 см). В узкой полосе частот в средней части диапазона (4-5 см) одновременно наблюдалась инверсия знака поляризации.
5. Дана интерпретация наблюдаемого явления как признак постепенного (в течение трех дней) формирования волокна в высотной структуре АО, дестабилизация которого за два часа до вспышки, по-видимому инициировала начало процессов мощного энерговыделения с корональным выбросом масс. В пользу этой гипотезы говорит явление двойной смены знака поляризации, которое может возникать при присутствии в атмосфере над активной областью слоя холодной плазмы, что ведет к смене знака градиента кинетических температур по высоте, и, таким образом, к появлению избытка излучения обыкновенной волны в ограниченной полосе частот.
6. Обнаружены несколько новых явлений в микроволновом излучении на ранней стадии в предвспышечной фазе вспышечно-продуктивных активных областей, связанные с генерацией мощных вспышек.
 - эффект коротковолновой инверсии круговой поляризации в активных областях,
 - эффект коротковолнового увеличения потока поляризованного излучения,
 - эффект частотного взаимодействия мод и эффект многократной инверсии знака круговой поляризации по частоте и времени.

Определены временные характеристики и диапазон частот, в котором возникают указанные явления. Дальнейшие исследования этих явлений могут быть использованы для разработки эффективных прогнозов вспышек и для уточнения сценариев вспышек.

Библиография

- [1] Агафонов М.И., Подвойская О.А. Восстановление двумерного распределения яркости итерационными алгоритмами при ограниченном количестве сканов ножевым лучом // Известия Вузов, Радиофизика, 1989, т.32, #6, 742-751
- [2] Андрианов С.А., Ахмедов Ш.Б., Богод В.М., Болдырев С.И., Боровик В.Н., Гельфрейх Г. Б., Зуева В.А., Коржавин А.Н., Петров З.Е., Плотников В.М., Плотникова Г.Б., Чех С.А. Результаты наблюдений Солнца на радиотелескопе РАТАН-600 в диапазоне 2-4 см в период года солнечного минимума. Данные наблюдений 15 декабря 1979 - 3 апреля 1980, Москва, 1990, 176с.
- [3] Ахмедов Ш.Б., Гельфрейх Г. Б. Избыточное излучение локальных источников биполярных групп пятен // Солнечные данные. 1981. N6. С. 107-112.
- [4] Akhmedov Sh., Gelfreikh G., Bogod V.M. & Korzhavin A.N. The measurement of magnetic fields in the solar atmosphere above sunspots using gyroresonance emission, 1982 // Sol.Phys., 7, 41-58
- [5] Алтынцев А.Т., Банин В.Г, Куклин Г.В., Томозов В.М. Солнечные вспышки.- М., Наука, 1982. -247с.
- [6] Avdjushin S.L, et al. Вариации радиоизлучения активных областей на Солнце и их корреляция со вспышками // Rept. RadioLab. Helsinki Univ. Technol. 1986. N 166. P. 24-27.
- [7] Averianikhina E.A., Paupere M., Eliass M., Ozolins G. Analysis of small pre-flare activity from radio observations at 755 MHz and 612MHz // Astron. Nachrichten. 1990. V.311. N6. P. 367-369.

- [8] Bhonsle R.V., Degaonkar S.S., Alurkar S.K. Ground-based solar radio observations of the August 1972 events // Space Sci. Rev. 1976. V.19. N4/5. P. 475-488.
- [9] В.М.Богод, В.И.Гараимов, Н.П.Комар, С.Х.Тохчукова, Е.Н.Спринский, В.Б.Хайкин, О.А.Викторов, О наблюдениях Солнца на РАТАН-600 в режиме длительного сопровождения // "Солнце в максимуме активности и солнечно-земные аналогии" Сб.тезисов международной конференции, Петербург, Пулковое, сентябрь 2000, стр.205-206.
- [10] В.М.Богод, С.Х.Тохчукова. Особенности микроволнового излучения активных областей генерирующих мощные солнечные вспышки, 2002, принято в ПАЖ.
- [11] Bogod V., Tokhchukova S. About microwave emission of flare productive active regions, 2002, Труды международной конференции "Солнечная активность и космические лучи после смены знака полярного магнитного поля Солнца", Санкт - Петербург, 2002,
- [12] Богод В.М., Тохчукова С.Х. Особенности микроволнового излучения активных областей генерирующих мощные солнечные вспышки // Письма в АЖ, 2002, (принято к печати)
- [13] V.M.Bogod, S.Kh.Tokhchukova, Spectral-polarization behaviour of solar active regions producing powerful flares, Proc. 10th. European Solar Physics Meeting, 'Solar Variability: From Core to Outer Frontiers', Prague, Czech Republic, 9-14 September 2002 (ESA SP-506, December 2002), pp. 279–282.
- [14] Богод В.М., Минченко Б.И., Петров З.Е, Зверев Ю.К., Коржавин А.Н, Дикий В.И, Ахмедов Ш.Б, Боровик В.Н, Гельфрейх Г.Б., 1983, Результаты совместных наблюдений Солнца на радиотелескопах РАТАН-600 (южный сектор с перископом в 5 азимутах) и VLA (США) в июле 1982 года // Отчет САО РАН.
- [15] Богод В.М., Ватрушин С.М., Абрамов-Максимов В.Е., Цветков С.В., Дикий В.Н., Панорамный радиометрический анализатор спектра диапазона 3, 5 ГГц - 18 ГГц с цифровой обработкой информации // 1993, Препринт САО # 84

- [16] Богод В.М., Гараимов В.И., Тохчукова С.Х., Шатилов В.А. Повышение точности поляризационных наблюдений на РАТАН-600 // в сб. "Проблемы современной радиоастрономии", Т.3, стр.40-41, С.Петербург, 1997.
- [17] V.M.Bogod, V.I.Garaimov, S.Tokhchukova. About a possibility of solar proton events prediction using wide range microwave spectral and polarization radio observations // Proceedings of International conference on Solar Physics "New cycle of solar activity: observations and theory" held in Pulkovo, S.Petersburg, Russia, June 25-29, 1998.pp.201-205.
- [18] Bogod V., Grebinskij A., Garaimov V., Urpo S., Fu Q.J., Zhang H.: Pre- and post-flare evolution of AR 8038 on May 9 - 14, 1997 with Metsahovi-RATAN-BAO spectral microwave observations, // Bull.Spec.Astrophys.Obs., 1999, v.48, 17.
- [19] V.M. Bogod, V.I. Garaimov, N.P. Komar, A.N. Korzhavin. Upgrade and Development of Software for Presentation of the Data, // 1999, Proc. 9-th European Meeting on Solar Physics, Florence, Italy, 1253
- [20] Bogod V., Mercier L., Yasnov L. About the nature of long-term microflare energy release in solar active regions, Juournal of Geophysical Research, 2001, 106, NA11, 25.353
- [21] Borovik V.N., Gelfreikh G.B., Bogod V.M., Korzhavin A.N., Krueger A., Hildebrandt J., Urpo S. The spectrum of coronal sources at millimetre and centimetre waves // 1989, Solar Physics, 124, 157
- [22] В.Н.Боровик, В.Г.Медарь, С.Х.Тохчукова, Микроволновые радионаблюдения на РАТАН-600 вспышечно-активных областей на Солнце, связанных с выбросом корональной массы // Труды международной конференции "Солнце в эпоху смены знака магнитного поля", 28 мая - 1 июня 2001, С.Петербург, с.65-72.
- [23] Bracewell, R.N.; Riddle, A.C. Inversion of Fan-Beam Scans in Radio Astronomy, 1967// Astrophysical Journal, vol.150, p.427
- [24] Буров В. А., Канцеровская Н.И., Сиромолот Р.Ю. О возможности рутинного оперативного прогноза вспышечной активности // Радиоизлучение Солнца. 1984. N5. С. 150-153.

- [25] Cohen, M.H. On the Reversal of the Sense of Rotation in Solar Microwave Bursts // *Astrophys.J.*, **131**, 664 (1960).
- [26] Covington, A.E. Decrease of 2800 MHz Solar Radio Emission Associated with a Moving Dark Filament 15 min. Before the Flare of May 19, 1969 // *Solar Phys.*, v.33, 439 (1973).
- [27] Chiuderi- Drago F., Alissandrakis C.E., Bastian T., Bochialini K., Harrison R.A. Joint EUV/Radio Observations of a Solar Filament // *Solar Phys.*, 2001, v.199, 115.
- [28] Charikov Yu.E, Dmitriev P.V., Mursula K., Soft X-Rays from coronal loops: oscillations with minute time scale. Труды конф. "Активные процессы на Солнце и на звездах", Санкт-Петербург, 1-6 июля 2002, под ред. Зайцева В.В., Яснова Л.В., с.285 - 288
- [29] Enome S. A review of short-term flare forecasting activities at Toyokawa. - ISTPPWP, 1978. Preprint N11. P. 10.
- [30] Enome S., Shibasaki K., Takayanagi T., Takata S. Atlas of solar radio bursts for 1982 // Toyokawa Observatory, WDC-C2. - Toyokawa, 1983. 272p.
- [31] Freeland, S.L.; Handy, B.N. Data Analysis with the SolarSoft System // *Solar Physics*, 1998, v.182, Issue 2, p.497-500 .
- [32] Fujiki, K.; Nakajima, H. Microwave Preflare Enhancement and Depletion in Long Duration Events // *Advances in Space Research*, 2000, v.26, Issue 3, p.477.
- [33] Gaizauskas V. Preflare activity // *Solar Phys.* 1989. V.121. N1. P. 135-152.
- [34] D.E.Gary, M.D.Hartl, T.Shimuzu, Nonthermal Radio Emission from Solar Soft X-Ray Transient Brightenings // *Astrophys.J.*, v.477, 958-968, 1997
- [35] Гельфрейх Г. Б., Ахмедов Ш.Б., Боровик В.Н., Гольнев В. Я., Коржавин А. Н., Нагнибеда В. Г., Петерова Н. Г. Наблюдения локальных источников микроволнового излучения на Солнце // *Известия ГАО*. 1968. N. 185. С. 164-178.

- [36] Гельфрейх Г.Б. Радиоастрономический способ юстировки антенны переменного профиля // Известия ГАО АН СССР, 188, 139-148, 1972.
- [37] Гельфрейх Г.Б. Об одном алгоритме расчета диаграммы направленности антенны типа РАТАН-600 с учетом абберационных и поляризационных эффектов // Астрофиз.исслед.(Изв.САО), 9, 89-98, 1977.
- [38] Гельфрейх Г.Б. Микроволновая диагностика магнитных полей Солнца.- в кн."Динамика токовых слоев и физика солнечной активности", Рига, Зинатне, 1982, стр. 116-124.
- [39] Г.Б.Гельфрейх, Л.В.Опейкина. Моделирование работы РАТАН- 600 в режиме радиогелиографа // Препринт САО РАН, 1992, N 96.
- [40] Gelfreikh G.B. Radio Measurements of Coronal Magnetic Fields (Invited) // in IAU Colloq.144 "Solar Coronal Structures" by V.Rusin, P.Heinzel & J.-C.Vial(eds), 21-28, (1994)
- [41] G.B. Gelfreikh, 1999, Physics of the Solar Active Regions from Radio Observations, Proceeding of Nobeyama Symposium, NRO Report N 479, 41
- [42] Гельфрейх Г.Б., Петерова Н.Г., Цветков С.В. О методике прогнозирования солнечных протонных вспышек на БПР на основе критерия Танаки-Эноме, 1989 // Солнечные данные, 10, 89-98.
- [43] Gelfreikh G.B., Bogod V.M., Abramov-Maximov V.E., Tsvetkov S.V.: 1993, Measurements of solar magnetic fields using radio observations with the RATAN-600, The Magnetic and Velocity Fields of Solar Active Regions, ASP Conference Series, v.46, 271.
- [44] O.A.Golubchina, G.Zhekanis, V.Bogod, T.Plyaskina, N.Komar, V.Garaimov, S.Tokhchukova, The possibility of quick processes research on the Sun in quasitracking regime with radiotelescope RATAN-600, preprint SAO N134, St.Petersburg, 2000
- [45] O.A.Golubchina, G.V.Zhekanis, V.M.Bogod, S.Kh.Tokhchukova "The construction of two-dimensional image of the Sun with radio telescope RATAN-600" // Proc. 10th. European Solar Physics Meeting, 'Solar Variability: From Core to Outer Frontiers', Prague, Czech Republic, 9-14 September 2002 (ESA SP-506, December 2002) pp.939-942.

- [46] Голубчина О.А., Голубчин Г.С. Метод эстафеты.- Астрофизические исследования (Изв. САО АН СССР), 1981, N 14.
- [47] Голубчина О.А., Голубчин Г.С. Попытки построения двумерного изображения Солнца по наблюдениям, выполненным на РАТАН-600., Метод эстафеты.- Радиофизика, 1983, 26, N 11.
- [48] Голубчина О.А. Метод "эстафеты с зонированием", Изв. САО #21, 1986, 75-84
- [49] Gopalswamy, N.; Yashiro, S.; Kaiser, M.L.; Thompson, B.J.; Plunkett, S. Multi-wavelength Signatures of Coronal Mass Ejection // 1999, in T.S.Bastian, N.Gopalswamy, and K.Shibasaki (eds), Solar physics with radio observations, Proceedings of the Nobeyama Symposium, NRO Report v.479, 207.
- [50] Гранат А. Д., Степанов А. В., Цветков Л. И. Диагностика плазмы солнечных вспышек на основе наблюдений микроволнового излучения // Изв. Крымской Астроф. обсерватории. 1991. Т. 83. С.53-60.
- [51] Grossman A, Morlet J., "Decomposition of functions into wavelets of constant shape, and related transforms", in Mathematics+Physics, Lectures on Recent Results Vol.1 (Ed. L Streit) (Singapore: World Scientific, 1985)
- [52] Гараимов В.И., 1997, Обработка массивов одномерных векторов данных в ОС Windows. Программа Work Scan- версия 2.3 //Препринт САО #127Т, Нижний Архыз
- [53] Гараимов В.И., 1998, Кандидатская диссертация, Нижний Архыз
- [54] Hanaoka Y.:Double-loop configuration of solar flares// Solar Phys., 1997, v.173, p. 319.
- [55] Heinzel P., Schmieder B., Tziotziou K., : Why Are Solar Filaments More Extended in Extreme-Ultraviolet Lines than in H_{α} ? APJ, 2001, v.561, p.223.
- [56] Heyvaerts, J., Priest J.M. & Rust D.M.:An emerging flux model for the solar flare phenomenon, 1977// ApJ. , 216, 123

- [57] Hirman J.W., Neidig D.F., Seagraves P. EL, et al. The application multivariate discriminant analysis to solar flare forecasting // ISTPPWP, 1978. Preprint N28.
- [58] Hogbom, J.A., Aperture Synthesis with a Non-Regular Distribution of Interferometer Baselines, 1974 // A&A Suppl. 15:417-26
- [59] Hurford G.J., Zirin H. Interferometric observations of solar flare precursors at 10, 6 GHz // Air Force Geophys. Lab. 1982. TR-82-0117.
- [60] Hurford, G. J.; Read, R. B.; Zirin, H. A Frequency Angle Interferometer for Solar Microwave Spectroscopy // Solar Phys. 1984. V.94. P. 413-426.
- [61] Ипатова Л.П., Яснгов Л.В. Связь спектра радиоизлучения Солнца со всплесковой активностью // Солнечные данные, 1988, 7, с. 99-102
- [62] Ишков В. Н. О реализации больших вспышек во вспышечноактивных областях // В сб.: Исследования солнечной плазмы, Под ред. Б.В.Сомова. - Ашхабад: Ылым, 1989. С. 95-99.
- [63] Kai K. Radioheliographic observations // Proc. Astron. Soc. Australia. 1969. V.I. N1. P. 186-190.
- [64] Kai K., Nakajima H., Kosugi T. Radio observations of small activity prior to main energy release in solar flares // Publ. Astron. Soc. Japan. 1983. V.35. N2. P. 285-297.
- [65] Kaufmann P., Strauss E. M., RanaeUi I. C. et al. New aspects of solar activity found high sensitivity observations at cm and mm wavelength // ISTPPWP, 1978. Preprint N20. P.9.
- [66] С.Э.Хайкин, Н.Л.Кайдановский., Новый радиотелескоп высокой разрешающей силы // Приборы и техника эксперимента, 1959, N 2.
- [67] Хайкин В.Б., Майорова Е.К., Чухлебов М.И., Богод В.М., Тохчукова С.Х., Рухлев В.Ф.: Длительное сопровождение Солнца на радиотелескопе РАТАН-600 в режиме работы с сокращенной апертурой // в сб. "Проблемы современной радиоастрономии", Т.3, стр.54-55, С.Петербург, 1997.

- [68] V.B.Khaikin, E.K.Majorova, I.G.Efimov, O.A.Victorov, V.M.Bogod, S.Kh.Tokhchukova, Long time tracking of the Sun with RATAN-600 in Radio Schmidt mode // in Proceedings of the VII Russian-Finnish Symposium on Radioastronomy, held in Saint Petersburg, June 28-July 3, 1999., pp.125-128.
- [69] Кобрин М. М. Изучение возможности использования наблюдений флуктуации радиоизлучения Солнца на радиотелескопе РТ-2Ф в диапазоне 3см для целей краткосрочного прогнозирования мощных вспышек / отчет "Период" N гос. регистрации 78077752, НР1РФР1. - Горький: НР1РФР1, 1979. 146с.
- [70] Кононов В.К., Павлов С.В., Мингалиев М.Г., Верходанов О.В., Нержельская Е.К., Хубиева Н.В., 2001, Препринт САО # 164
- [71] Konovalov, S.K.; Altyntsev, A.T.; Grechnev, V.V.; Lisysian, E.G.; Rudenko, G.V.; Magun, A., IDL Library Developed in the Institute of Solar-Terrestrial Physics (Irkutsk, Russia)// Astronomical Data Analysis Software and Systems VI, A.S.P. Conference Series, Vol.125, 1997, Gareth Hunt and H.E.Payne, eds., p.447
- [72] Коробчук О.В., Петерова Н.Г., Спектральные исследования протонно-активных областей на Солнце в сантиметровом диапазоне волн // 1980, в сб. "Прогнозирование солнечных вспышек и их последствий"(серия Радиоизлучение Солнца, вып.5), изд.ЛГУ, Л., с.102-114.
- [73] Korobchuk, O. V.; Peterova, N. G. Spectral studies of solar proton-active regions at centimeter wavelengths // in: Prediction of solar flares and their consequences, Leningrad, Izdatel'stvo Leningradskogo Universiteta, 1984
- [74] Korol'kov D.V. & Parijskij Yu.N., The Soviet RATAN-600 radio telescope //Sky and Telescope, 1979, v. 57, pp.324-329.
- [75] Крюгер А. Солнечная радиоастрономия и радиофизика, М., Мир, 1984.
- [76] M.R.Kundu, S.M.White, K.Shibasaki, J.P.Raulin, A Radio Study of the Evolution of Spatial Structure of an Active Region and Flare Productivity // Astrophys. J. Suppl.Ser., 133, 2001, 467-482 .

- [77] Kundu M.R., Solar radio astronomy, Michigan: Ann Arbor, 1964, V.1 - 2
- [78] Kundu M.R., Schmahl E.J., Velusamy T., Vlahos L. Radio imaging of solar flares using the Very Large Array: new insights into flare process // Astron. Astrophys. 1982. V.108. P. 188-194.
- [79] Kundu M.R., Schmahl E.J., Velusamy T. Magnetic structure of a flaring region producing impulsive microwave and hard X-rays bursts // Astrophys. J. 1982. V.253. P. 963-974.
- [80] Velusamy T., Kundu M. VLA observations of the evolution of a solar burst source structure at 6 centimeter wavelength // Astrophys. J. 1982. V. 258. P. 388-392.
- [81] Kundu M.R., Gaizauskas V., Woodgate B.E., Schmahl E.J., Shine R., Jones H.P. A study of flare buildup from simultaneous observations in microwave, H_α and UV wavelength // Astroph. J. Suppl. Ser. 1985. V.57. P. 621-630.
- [82] Kundu M.R., Shevgaonkar R.K. Multiwavelength observations of a preflare solar active region using the VLA // Astrophys. J. 1985. V. 291. P. 860-864.
- [83] Kundu M., Melozzi M, Shevgaonkar R.: 1986, A study of solar filaments from high resolution microwave observations// A& A, v.167, 166.
- [84] Kundu M.R. A high spatial resolution study of microwave flare precursors // Adv. Space Res. 1986. V.6. N6. P. 93-96.
- [85] Landsman, W.B., The IDL Astronomy User's Library // Astronomical Data Analysis Software and Systems IV, ASP Conference Series, Vol. 77, 1995, R.A.Shaw, H.E.Payne, and J.J.E.Hayes, eds., p.437.
- [86] Lang K. R. Polarization microwave observations // Solar Phys. 1974. V.36. N2. P. 351-364.
- [87] Lang K. R. Solar-Terrestrial Prediction Proceedings III / Ed. R. F. Donnelly. - Solar Activity Predictions US Dept. of commerce, 1980. P. 131.
- [88] Lang K.R., Wilson R.F. Solar burst precursors and energy buildup at microwave wavelengths // Adv. Space Res. 1986. V.6. N.6. P. 97-100.

- [89] Lang K.R., Willson R.F., Kile, J.N., Jemen, J., Strong K.T., Bogod V.M., Gelfreikh G.B., Ryabov B.I., Hafizov S.R., Abramov V.E., Svetkov S.V.: Magnetospheres of Solar Active Regions Inferred from Spectral-Polarization Observations with High Spatial Resolution, 1993 // *Astroph.J.*, v.419, 398.
- [90] Левин Б.Н., Фридман В.М., Шейнер О. А. Некоторые результаты спектрографических исследований (8-12ГГц) предвестников и всплесков в поляризованном излучении // Тезисы докл. XX Все-союзной конф. по радиофизическим исследованиям солнечной си-стемы. - Симферополь: КрАО, 1988. С. 94.
- [91] Liu Y., Zheng L. Solar microwave radiation flux and the short-term prediction of proton events // *Solar-Terrestrial Prediction-V (STPW'96)*. Proceedings of a Workshop at Hitachi, Japan, January 23-27, 1996. - Tokyo: RCW, 1997. P. 196-199.
- [92] Loukitcheva, M.; Nagnibeda, V. Chromosphere Active Region Plasma Diagnostics Based On Observations Of Millimeter Radiation. Proc. of the Conference 8th SOHO Workshop: Plasma Dynamics and Diagnostics in the Solar Transition Region and Corona, 22-25 June 1999 Edited by J.-C. Vial and B. Kaldeich-Schumann, p.451
- [93] Майорова Е.К., Кандидатская диссертация. САО АН СССР, 1985.
- [94] Максимов В. П. Исследование подготовительной стадии солнечных эруптивных событий. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора физ.-мат. наук. - Иркутск, 1998.
- [95] Martin S.F. Preflare conditions, changes and events // *Solar Phys.* 1980. V.68. N2. P. 217-236.
- [96] Mayfield E.B., White K. P. Pre-flare association of magnetic fields and millimeter-wave radio emission // *Solar Phys.* 1976. V.47. N1. P. 277.
- [97] Melozzi M., Kundu M.R., Shevgaonkar R.K. Simultaneous microwave observations of solar flares at 6 and 20 cm wavelengths using the VLA // *Solar Phys.* 1985. V. 97. N2. P. 345-361.
- [98] Melrose D.B., Flare models and radio emission, 1998, Proc.of Nobeyama Symposium, 479, 371-380

- [99] Минченко Б.С., Восстановление распределения радиояркости при наблюдениях с ножевой диаграммой // Астрофизические исследования (Изв. САО АН СССР), 1977, N 9.
- [100] Минченко Б.С., Быстрое картографирование на радиотелескопе РАТАН- 600 // Астрофизические исследования (Изв. САО АН СССР), 1978, N 10.
- [101] Минченко Б.С. Кандидатская диссертация. ГАО АН СССР, 1979.
- [102] Минченко Б.С., Азимутальный апертурный синтез Солнца на радиотелескопе РАТАН- 600 в режиме "юг с перископом"// Астрофизические исследования (Изв. САО АН СССР), 1986, N 21.
- [103] Moreton G.E., Severny A.B.:Magnetic Fields and Flares in the Region CMP 20 September 1963, 1968 // Solar Physics, v3, p.282-297.
- [104] A.Nindos, M.R.Kundu, S.M.White, K.Shibasaki, N.Gopalswamy, Astrophys.J.Suppl.Ser., 130, 2000, 485-499.
- [105] A.Nindos, C.E.Alistandrakis, G.B.Gelfreikh, V.N.Borovik, A.N.Korzhavin, V.M.Bogod, 1996, Two-dimensional mapping of the sun with THE RATAN-600 // Solar Physics, #165, 41-59
- [106] Опейкина Л.В., Богод В.М., Гребинский А.С., Тохчукова С.Х., Гельфрейх Г.Б.: Расчеты многолепестковых диаграмм в различных режимах работы радиогелиографа РАТАН-600 // в сб. "Проблемы современной радиоастрономии", Т.3, стр.46-47, С.Петербург, 1997.
- [107] Парийский Ю.Н., Шиврис О.Н., Методы радиоастрономического использования РАТАН- 600 // Астрофизические исследования (Изв. ГАО), 1972, # 188, с.3-11
- [108] Парийский Ю.Н., РАТАН- 600 и апертурный синтез // Препринт САО АН СССР, 1986, N 33 Л.
- [109] Пасечник С. В., Тельнюк-Адамчук В. В. Предсказание больших вспышек в группах пятен с учетом цены ошибки прогноза // Вестник Киевского университета. Астрономия. 1986. Вып. 28. С.37-40.
- [110] Petchek, H.E., in Proc.AAS-NASA Symp.on Physics of Solar Flares, edited by W.N.Hess, NASA SP-50, Washington, D.C., 425-439, 1964.

- [111] Peterova N.G., Ryabov B.I., Tokhchukova S.Kh., Microwave observations of the active region with a coronal streamer // JENAM2000 Abstracts, Moscow, pp.134
- [112] N.G.Peterova, B.I.Ryabov, .Kh.Tokhchukova., A peculiar microwave source in the structure of the NOAA 8108 AR from observations with RATAN-600 // Bul.Spec.Astroph.Obs., 2001 #51, pp. 106-111
- [113] Peterova N.G., On the relation between sunspot and interspot components of microwave radiation of solar active regions, 1994, Bull. Spec. Asrophys. Obs., v.38, pp.133-142.
- [114] Pustilnik, L.A., Instability of quiescent prominences and the origin of solar flares Instability of quiescent prominences and the origin of solar flares, 1974., // Soviet Astronomy, Vol.17, p.763
- [115] Rust, D.M., Sakurai, T., Gaizauskas, V., Hofmann, A., Martin, S.F.; Priest, E.R.; Wang, J., Preflare state, 1994, Solar Physics, vol. 153, no. 1-2, p. 1-17
- [116] Ryabov, B.I., N.A.Pilyeva, C.E.Alissandrakis, K.Shibasaki, V.M.Bogod, V.I.Garaimov and G.B.Gelfreikh, Solar Phys., #185, 157-175, 1999.
- [117] Sawyer C., Warwick J.W., Dennett J. T. Solar Flare Prediction. - Colorado Associated University Press, 1986. 179p.
- [118] Schmahl E.J., Bobrowsky M., Kundu M.R.: 1981, Observations of solar filaments at 8, 15, 22 and 43 GHz// Solar Phys., v.71, 311.
- [119] <http://www.sel.noaa.gov/Data/index.html>
- [120] http://www.sec.noaa.gov/solar_images/2000_07/2000_07_14.html
- [121] Северный А.Б., Стешенко Н.В. Методы прогнозирования солнечной активности // Доклад на междунар. симпозиуме по солнечно-земным связям. Ленинград, 1970
- [122] <http://www.sel.noaa.gov/weekly/>
- [123] Шатилов В.А., 1986, Изв.САО #25, 168-175

- [124] Шатилов В.А., 1995, Программное обеспечение солнечных наблюдений: регистрация, обработка, архив. (<http://www.ratan.sao.ru/sun/manual/shatl1.html>)
- [125] Shibasaki K., Chiuderi-Drago F., Melozzi M., Slottje C., Antonucci E. Microwave, ultraviolet and soft X-ray observations of Hale region 16898 // Solar Phys., 1983, V.89, N2, pp.307-321.
- [126] Shibata K.:Reconnection Models of Flares, 1998 // in T.S.Bastian, N.Gopalswamy, and K.Shibasaki (eds), Solar physics with radio observations, Proceedings of the Nobeyama Symposium, NRO Report v.479, 381.
- [127] Шиврис О. Н., 1980, Работа радиотелескопа РАТАН-600 с плоским отражателем // Изв.САО # 12, p.134-140.
- [128] Смольков Г. Я., Максимов В. П., Уралов А.М. Радиогелиографическая диагностика предвспышечного состояния активных областей. В сб.: Солнечно-земная физика // Труды VII симпозиума по солнечно-земной физике России и стран СНГ. - Троицк, 1999. С. 174-178.
- [129] <http://sohowww.nascom.nasa.gov/> , <ftp://sohoftp.nascom.nasa.gov/pub/data>
- [130] Stahl P. A. Solar-flare prognostication by the empirical-statistical approach // J. Roy. Astron. Soc. Can., 1983, V.77. N4. P. 203-213.
- [131] Steffen P. On the type of spectra of s-component sources and their correlation with flare occurrence // Solar Phys., 1980, V.67. N1. P. 89-100.
- [132] Svestka Z., 1976, Solar Flares, Geophysics and Astrophysics Monographs, v.6
- [133] Robert A. Sych and Yi-Hua Yan, Wavelet cleaning of Solar Dynamic Radio Spectrograms // Chinese Journal of Astronomy and Astrophysics, Vol.2, (2002), No.2, 183-192.
- [134] Sych R. A., Uralov A. M., Korzhavin A. N. Radio observations of compact sources located between sunspots // Solar Phys. 1993. V. 144. N1. P. 59-68.

- [135] Tanaka H., Kakinuma T., The relation between the spectrum of slowly varying component of solar radio emission and solar proton event, 1964, Rep. Ionosph. Space Res. Japan, v.18, p.32-44.
- [136] Tanaka H., Enome S., The microwave structure of coronal condensations and its relation to proton flares, 1975, Solar Phys., v.40, p.123-131.
- [137] Тихомиров Ю.В., Фридман В.М., Шейнер О. А. О некоторых характеристиках предвестников солнечных импульсных микроволновых всплесков в диапазоне 8-12 ГГц // Солнечные данные. 1987. №2. С. 70-76.
- [138] Tokhchukova S., Garaimov V., Bogod V. About a possibility of solar proton events predication using wide range microwave spectral and polarization radio observation // В сб.: Солнечно-земная физика. Труды VII симпозиума по солнечно-земной физике России и стран СНГ. - Троицк, 1999. С. 373-376.
- [139] С.Х.Тохчукова, В.М.Богод, А.С.Гребинский, Микроволновое потемнение активных областей перед протонными вспышками // в сб. "Солнце в максимуме активности и солнечно-земные аналогии" тезисов международной конференции, С.Петербург, Пулково, сентябрь 2000, стр.140-142.
- [140] С.Х.Тохчукова, В.М.Богод, В.И.Гараимов, В.Б.Хайкин, Е.К.Майорова, Пробные наблюдения в режиме многоволнового азимутального апертурного синтеза на РАТАН-600 // "Солнце в максимуме активности и солнечно-земные аналогии" Сб.тезисов международной конференции, Петербург, Пулково, сентябрь 2000, стр.223-224.
- [141] Tokhchukova S., Microwave darkening of solar active regions before flares // SOLSPA 2001 Euroconference abstract book, p.42.
- [142] Tokhchukova S., Bogod V., Detection of the long-term microwave "darkening" before the July 14, 2000 flare, 2002 // Solar Phys., in press (H1394s)

- [143] С.Х. Тохчукова, Реализация метода многоазимутальных наблюдений Солнца на РАТАН-600” // Препринт САО РАН, Нижний Архыз, 2002, N174, с.1-27.
- [144] Тохчукова С.Х.: О возможности предсказания солнечных протонных событий по широкодиапазонным спектрально-поляризационным наблюдениям // Сб. тезисов докладов школы-семинара молодых радиоастрономов, Пущино, 1998
- [145] <ftp://solar.nro.nao.ac.jp/pub/norp/data/daily/>
- [146] van Hoven G., Hurford G. J. Flare precursors and onset // Adv. Space Res. 1984. V.4. N7. P. 95-103.
- [147] Ватрушин С.М., Коржавин А.Н., Пекулярные радиоисточники во вспышечно- активных областях на Солнце и их возможная связь с токовыми слоями, 1989, в сб. Физика солнечной плазмы, М., Наука, с.100-106.
- [148] Velusamy, T.; Kundu, M. R. VLA observations of the evolution of a solar burst source structure at 6 centimeter wavelength Astrophysical Journal, Part 1, vol. 258, July 1, 1982, p. 388-392.
- [149] В.В.Витязев, ”Вейвлет-анализ временных рядов”, 1996 //учебное пособие, изд. СПбГУ, 58 стр.
- [150] Верховданов О.В., 1995, Интерактивная первичная графическая обработка одномерных векторов данных в оболочке X-window под ОС UNIX на РАТАН-600 // Препринт САО # 106
- [151] Wells D.C., Greisen E.W., Harten R.H.: FITS:A Flexible Image Transport System, 1981, Astron. Astrophys. Suppl. Ser., 44, P.363-370.
- [152] White S.M., Kundu M.R., Gopalswamy N. Strong magnetic fields and inhomogeneity in the solar corona // Astrophys. J. 1991. V.366. N1. P.L43-L46.
- [153] White, S.M., Kundu, M.R., and Gopalswamy, N.: 1992, Simultaneous Hard X-ray, Soft X-ray, Millimeter and Microwave Observations of a Solar Flare// APJ Suppl Ser, v.78, 599.

- [154] Willson R. F. High resolution observations of solar radio bursts at 2, 6 and 20cm wavelength // Solar Phys. 1983. V.83. N2. P. 285-303.
- [155] Willson R.F., The Radio and EUV signatures of small-scale coronal magnetic reconnection events, 1998, Solar Jets and Coronal Plumes, Proceedings of an International meeting, Guadeloupe, France, 23-26 Feb. 1998, Publ.Paris, 1998, ESA SP-421, p.349.
- [156] Wu H.-A., Periodic oscillation in solar radio emission preceding microwave burst // Chinese Journal of Space Science. 1982. V.2. P. 31-37.
- [157] Yihua Yan, Yuanyong Deng, Marian Karlicky, Qijun Fu, Shujuan Wang, and Yuying Liu: The Magnetic Rope Structure and Associated Energetic Processes in the 2000 July 14 Solar Flare, 2001 // Astroph.J., v.551, 115.
- [158] Zaitsev, V.V., Stepanov A.V., The plasma radiation of flare kernels, Solar Phys., **88**, 297-313, (1983).
- [159] Zhang H., Sakurai T. Magnetic reconnection in the preflare phase of AR7186 of 1992 June 4 // 4th East Asian Meeting on Astronomy
- [160] Жеканис Г.В., Состояние и перспективы развития автоматизированной системы управления антенной РАТАН-600 // в сб. тезисов конференции Радиотелескопы РТ-2002. Антенны, аппаратура, методы. 9-11 октября 2002
- [161] Железняков В.В., Радиоизлучение Солнца и планет. М., Наука, 1964, 560с.
- [162] Железняков В.В., Излучение в астрофизической плазме, М., Янус-К, 1997, 432 с.
- [163] Zheleznyakov V., Kocharovsky V. & Kocharovsky Vl.: Linear mode coupling and polarization features of radiation in current sheets, 1996, A&A , 308, 685-696
- [164] Zlotnik E.Ya., 2001, Radiophysics and Quantum Electronics, 44, 1-2, 53-61 г., Пушкино, 2002, с.45