

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

СПЕЦИАЛЬНАЯ АСТРОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ

На правах рукописи
УДК 523.164.32

Гараимов Владимир Илларионович

Исследования тонкой структуры спектра и
поляризации источников солнечного радиоизлучения
по многоволновым наблюдениям на РАТАН-600

(01.03.02 - астрофизика, радиоастрономия)

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

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

НИЖНИЙ АРХЫЗ 1998

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
ГЛАВА 1. СИСТЕМА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ МНГОВОЛНОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ СОЛНЦА НА ПАС РАТАН-600 (ПРОГРАММА WORK SCAN).	27
ВВЕДЕНИЕ	27
ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОБРАБОТКИ СОЛНЕЧНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ НА ПАС РАТАН-600.	
ПРОГРАММА WORKSCAN	34
Идеология программы	34
Обработка данных	40
Калибровка данных и их коррекция	40
Анализ структуры радиоисточников	49
Выводы.....	55
ПРИЛОЖЕНИЯ	57
Приложение А Подключаемые библиотеки.....	57
Приложение В Форматы записи данных.....	59
Приложение С Утилита ChoosedScan.....	62
Приложение D Полное описание функций меню	64
ГЛАВА 2. ШУМОВЫЕ БУРИ И СТРУКТУРА МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ АКТИВНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ НА СОЛНЦЕ.	68
ВВЕДЕНИЕ.....	68
ОПИСАНИЕ СЕРИИ СОВМЕСТНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ НА РАТАН-600 и VLA.	70
Описание наблюдений на РАТАН-600.....	71
VLA наблюдения	81
ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ.....	83
Выводы.....	89
ГЛАВА 3. ОСОБЕННОСТИ ПОЛЯРИЗАЦИИ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ В АКТИВНЫХ ОБЛАСТЯХ В ПРИСУТСТВИИ ШУМОВЫХ БУРЬ.	91
ВВЕДЕНИЕ	91
РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ	93
Период 28 октября - 4 ноября 1994 года.....	96
Период 15-17 июля 1995 года.	105
Наблюдения 27 марта, 1995.....	108
ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ	111
Выводы.....	116
ГЛАВА 4. ЗАЛИМБОВЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ПРОТУБЕРАНЦА 4 ОКТЯБРЯ 1996.	117
ВВЕДЕНИЕ	117
МАТЕРИАЛЫ НАБЛЮДЕНИЙ	129
Морфология активной области вблизи центра диска Солнца (наблюдения 24-25 сентября 1996 г.).....	130
Структура протуберанца по наблюдениям на W-на лимбе (наблюдения 4-6 октября 1996г.)	133
СПЕКТРАЛЬНО-ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ НАБЛЮДЕНИЙ НА РАТАН-600.	137
Обзор данных радионаблюдений	137
Структурный анализ области протуберанца на лимбе методом Гаусс анализа.	141
КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ НАБЛЮДЕНИЙ	147
Абсолютная калибровка потоков и температур радиоисточников	147
Отождествление радиоисточников и их физические параметры	148
Холодное волокно (источник А')	150
Горячие компоненты (источники А", В, С).	151
ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ.....	152
Инструментальные особенности измерения круговой поляризации на радиотелескопе РАТАН-600.....	153
Результаты наблюдения поляризации протуберанца на лимбе 4 октября 1996 года.....	158

Дискуссия.....	159
Выводы.....	163
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	164
ЛИТЕРАТУРА.....	166

ВВЕДЕНИЕ

Стремление человека к познанию окружающего мира явилось причиной возникновения и развития различных областей научного знания. Диапазон научных исследований охватывает как области изучения микромира и элементарных частиц, так и области изучения явлений и процессов, происходящих на галактических и метagalactic масштабах. Основой для экспериментальной и наблюдательной баз этих, казалось бы, далеких друг от друга областей научного знания является возможность описания поведения и свойств заряженных частиц в электрических и магнитных полях, а именно физика плазмы. Наземные экспериментальные установки позволяют получать магнитные поля в тысячи гаусс и температуру плазмы в миллионы градусов в импульсных режимах, что дает возможность исследовать взаимодействие частиц, но ограничивает возможность исследования стационарных явлений в высокотемпературной плазме и динамику ее развития на больших временах.

Звезды являются естественными лабораториями, где реализуются экстремальные условия и режимы для изучения поведения плазмы. Наша близость к Солнцу как к подобному объекту исследований ставит его на отдельную ступень в физических исследованиях. В отличие от изучения других звезд,

исследование процессов на Солнце дает нам возможность получения не только интегральных характеристик плазменных образований, но и детального исследования их морфологии. Исследование процессов в атмосфере Солнца позволяет исследовать плазму в широком температурном диапазоне (от 6000K на уровне фотосферы до миллионов градусов в солнечной короне) и в магнитных полях от нескольких гаусс на спокойных участках Солнца до нескольких тысяч гаусс в активных образованиях.

На сегодняшний день, при всем многообразии инструментов наблюдения за Солнцем (от наземных оптических телескопов до космических аппаратов, регистрирующих излучение в ультрафиолете и рентгене), радиоастрономические методы исследования дают прямую (не дублирующую оптические данные), разнообразную и часто уникальную информацию о состоянии солнечной атмосферы. Развитие радиоастрономической техники для наблюдений Солнца приводит к созданию многочастотных комплексов с высоким временным и пространственным разрешением, позволяющих получать детальные спектры в интенсивности и круговой поляризации. Данные, получаемые на таких комплексах, дают возможность проводить детальные исследования распределения магнитных полей, концентрации и электрических токов в плазме атмосферы Солнца.

Значительная часть сведений поступает из анализа поляризационной структуры солнечных образований. Поэтому проблема повышения точности поляризационных измерений всегда была в центре внимания солнечной радиоастрономии. Особенно важна эта задача при наблюдениях с высоким пространственным разрешением, где обычно оперируют с точностями измерения

степени поляризации в десятки процентов (крупные интерферометры VLA, WSRT и др.).

В частности, радиоастрономические наблюдения Солнца на радиотелескопе РАТАН-600 осуществляются с помощью комплекса ПАС (Панорамный Анализатор Спектра) на 40 частотах в диапазоне волн от 1.6см до 32см в правой и левой круговых поляризациях с временным разрешением несколько миллисекунд. Перекрытие столь широкого диапазона частот стало возможным благодаря использованию уникального совмещенного входного рупора (облучателя) конструкции Дикого В.Н. [17]. Однако, в нем существуют повышенные (по сравнению с традиционными волноводными рупорами) инструментальные погрешности. Но в результате накопленного материала было определено, что систематические погрешности стабильны и сохраняются на масштабах 2-3 недель, что позволяет их выделять на каждом частотном канале.

Важная особенность проведения солнечных наблюдений состоит в точном измерении круговой поляризации излучения. При наблюдениях в антенной системе Южного сектора и Перископического отражателя в качестве Главного зеркала [1] поляризационные искажения малы и составляют 0.5 - 1.0%, что позволяет изучать достаточно тонкие поляризационные эффекты.

Развитие такого многочастотного наблюдательного комплекса повлекло за собой разработку нового программного обеспечения для обработки получаемых наблюдений. Причинами развития систем обработки явились также значительное увеличение объема получаемых данных, требования к высокой оперативности

обработки результатов наблюдений, внедрение современной вычислительной техники и др.

Необходимость оперативной и детальной обработки большого наблюдательного материала, получаемого с помощью многоволнового комплекса ПАС на РАТАН-600, привела к созданию автором нового программного обеспечения. Разработанное программное обеспечение позволяет выполнять операции по статистической обработке, чистке от помех, исправлению кросс поляризационных и инструментальных погрешностей исходных записей. Применение этого программного обеспечения позволило провести ряд новых исследований активных образований на Солнце.

Основными целями работы являются:

1. Создание современного программного комплекса для обработки многоволновых наблюдений, получаемых на Панорамном Анализаторе Спектра.
2. Развитие методики обработки наблюдений с целью реализации предельной точности в спектрально-поляризационных измерениях.
3. Проведение астрофизических исследований тонкой спектрально-поляризационной структуры ряда солнечных образований.

Научная новизна работы

Регулярные наблюдения на новом многочастотном наблюдательном комплексе ПАС и резкое увеличение объема принимаемой информации требовали создания адекватного программного обеспечения для компьютерной обработки наблюдений. Созданный программный комплекс обеспечивает

обработку данных без ограничения по числу каналов регистрации, выполнен на современном уровне и удовлетворяет требованиям исследователей по всестороннему анализу наблюдений.

Наблюдения и обработка многочастотных поляризационных данных на ПАТАН-600 и сопоставление их с наблюдениями на других обсерваториях мира (VLA, США; Nobeyama, Япония) позволили проанализировать ряд активных образований в атмосфере Солнца. При этом, впервые были обнаружены статистические связи напряженности магнитного поля в активных образованиях, измеренных по наблюдениям в микроволновом диапазоне, с проявлением нетеплового излучения в виде шумовых бурь в метровом диапазоне. Впоследствии это привело к созданию концепции магнитосферы активной области, объясняющей процессы накопления энергии в магнитном поле активной области и ее высвобождение в виде нетепловой энергии.

Обнаружен ряд свойств активных областей, связанных с шумовыми бурями: особенности спектра радиоизлучения локальных источников в присутствии шумовых бурь (в частности, многократная смена знака поляризации локальных источников в микроволновом диапазоне); связь напряженности коронального магнитного поля с появлением и прекращением шумовых бурь.

При исследованиях радиоизлучения источников на лимбе Солнца впервые получен многочастотный спектр радиоизлучения протуберанца в диапазоне 2-16 ГГц в единовременных наблюдениях. Обнаружена многокомпонентная высотная структура протуберанца на лимбе и проведено отождествление ее со структурой в оптическом и рентгеновском диапазонах. При этом в результате спектрального анализа обнаружен новый

радиоисточник, не имеющий аналога в других диапазонах, расположенный на границе волокна и аркады как результат аннигиляции внутреннего магнитного поля протуберанца и внешнего магнитного поля аркады.

Научное и практическое значение

1. Создано адекватное математическое обеспечение для полной обработки наблюдений радиоизлучения Солнца на новом современном наблюдательном комплексе (Панорамный анализатор спектра) на радиотелескопе ПАТАН-600.
2. Созданный программный комплекс находится в регулярной эксплуатации в течение двух лет, как на радиотелескопе ПАТАН-600, так и в ряде сторонних организаций.
3. Высокая производительность программного комплекса позволяет проводить регулярную передачу наблюдательных данных по сети ИНТЕРНЕТ (адрес: <http://www.sao.ru/~sun> или на сервере спутника SOHO <http://sohowww.nascom.nasa.gov/data/synoptic>) и оперативно осуществлять наземную поддержку космических и международных наблюдательных программ.
4. Широкие вычислительные возможности программного комплекса позволяют развивать методику радиоастрономических наблюдений с целью достижения предельных точностей по координатным и поляризационным измерениям на ПАТАН-600.

5. Новые научные результаты по сопоставлению радиоизлучения активных областей в микроволновом и метровом диапазонах волн углубляют понимание процессов накопления и высвобождения энергии в активных областях Солнца.

6. Новые спектральные данные по радиоизлучению протуберанца на лимбе Солнца позволили расширить наши знания о его высотной структуре и являются экспериментальной базой для проверки реальности существующих моделей.

На защиту выносятся:

1. Методы, алгоритмы и программное обеспечение для обработки и представления данных многочастотных наблюдений.
2. Методику обработки наблюдений при реализации предельной точности в спектрально-поляризационных измерениях.
3. Результаты исследования корональных магнитных полей в активных областях Солнца в присутствии шумовых бурь (ШБ).
 - а) получение статистической зависимости напряженности магнитного поля в активных областях, связанных с наличием или отсутствием ШБ.
 - б) обнаружение тонкой структуры в спектрах круговой поляризации микроволнового излучения, связанных с ШБ, интерпретация этих явлений.
4. Обнаружение многокомпонентной структуры протуберанца, получение их спектров в широком диапазоне волн и определение физических характеристик отдельных компонент.

Апробация работы.

Основные результаты диссертации докладывались на IAU Colloquium No 144 (VEDA Publishing Company Bratislava-Printed in Slovakia, 1994), XXIV General Assembly of the URSI (Kyoto, Japan, August 25 - September 2, 1993), Workshop on coronal magnetic energy releases (Caputh (near Potsdam), Germany, May 16-20, 1994), 25-я Радиоастрономическая конференция (г.Пушино, 20-24 сентября 1993г), Conference "Radio Emission from the Stars and the Sun" (Barcelona, Spain, July 1995), XXVI Радиоастрономическая конференция (Сестрорецк, сентябрь, 1995), Конференция "Физика солнца" (Москва, ГАИШ, 6-8 декабря 1995г), конференция "Современные проблемы солнечной цикличности" (Пулково, С. Петербург, 26-30 мая 1997г), Assembly IAU 23, Kyoto, Japan, August 17-30, 1997, 2-nd ASP EUROCONFERENCE "Three Dimensional Structure of Solar Active Regions", Preveza, Greece, October 7-11, 27 радиоастрономическая конференция в С. Петербурге, 10-15 ноября 1997, а также на научных семинарах в ГАО и САО РАН.

Краткое содержание работы.

В первой главе описываются программно-методические разработки автора для обработки и представления многочастотных наблюдений, получаемых на РАТАН-600 на Панорамном анализаторе спектра.

Создание комплекса ПАС с большим количеством каналов (максимальное число - 96) и необходимость оперативного обмена данными с внешними пользователями при проведении комплексных наблюдательных программ требовало разработки адекватного математического обеспечения, основанного на современной вычислительной базе и сочетающего полноту обработки многоволновых данных с быстротой обработки, наглядностью представления и легкостью в освоении.

С другой стороны, при обработке наблюдений и сопоставлении их с данными других обсерваторий и космических аппаратов (SOHO, YONKON) требовался расширенный математический аппарат и необходимость использования общепринятых международных стандартов представления данных (FITS, PostScript). При этом, помимо задач, связанных с детальной обработкой интересующих образований, в последнее время стала актуальной задача ежедневной подготовки получаемых наблюдений для выставления их в компьютерную сеть Internet.

Все это послужило основой для создания нового программного обеспечения (ПО), основными требованиями к разработке которого были:

- быстрота обработки данных;
- неограниченность числа каналов;
- возможность быстрой передачи данных сторонним пользователям;
- развитый математический аппарат;
- открытость (возможность добавления новых функций обработки).

Необходимостью разработки специализированного ПО явилось использование целого ряда специфичных процедур обработки солнечных наблюдений. К ним можно отнести:

- необходимость одновременного представления многоволновых данных в большом динамическом диапазоне ввиду многооктавного перекрытия (около 5 октав) по частотному диапазону;
- необходимость создания статистического профиля спокойного Солнца;
- сопоставление профилей наблюдаемых компонент источников на разных волнах и в разные дни;
- необходимость создания поляризационных спектров радиоисточников (параметры Стокса I, V или отдельно компоненты I_R и I_L);
- необходимость учета специфики солнечных наблюдений в оптике и других диапазонах при сопоставлении результатов обработки и др.

Вышеперечисленные требования были реализованы автором в программе обработки «**Work Scan**». Программа написана на языке C++ с поддержкой **Drag&Drop** для загружаемых данных. С целью реализации в программе дружественного графического интерфейса и в связи с широким распространением операционной среды Windows, программа обработки выполнена в стандарте **Win32 (Windows95/NT)**.

Программа поддерживает форматы загружаемых файлов, соответствующих FITS-стандарту. Программа позволяет исправлять нефатальные ошибки записи, корректировать аппаратные эффекты поляризации, проводить несколько уровней

фона, вычислять поток выделенной части скана, делать гаусс-анализ участка записи, получать статистические профили исследуемых источников за некоторый период времени. Все перечисленные операции могут применяться к любому скану, любой группе сканов и всем сканам, загруженным в программу. Любое изображение, представленное на экране во время обработки, можно вывести на принтер или сохранить в цветном **WMF** (Windows Metafile) или черно-белом **PS** (Post Script) форматах. Разработан интерфейс подключения динамических библиотек, что позволяет добавлять в обработку собственные функции.

В конце главы описана утилита для сортировки и выборки загружаемых данных.

Во второй главе описываются результаты обработки данных, полученных на ПАС, ПАТАН-600, и сопоставления их с наблюдениями на других инструментах (Nancay, Франция; VLA, США) в течение периодов, связанных с шумовыми бурями. Были рассмотрены совместные наблюдения Солнца, выполненные на радиотелескопах ПАТАН-600 и VLA в течение мая 1992 года, мая 1993 года и августа 1993 года. В результате сопоставления спектров активных областей Солнца по наблюдениям на ПАТАН-600 (S компонента) в микроволновом диапазоне со всплесковой компонентой в метровом диапазоне волн на VLA обнаружено (вопреки существующим представлениям) наличие мощной и длительной шумовой бури именно в районе слабой активной области, при наличии на диске мощных АО (Май 1993). Полученные данные указывают на непосредственную связь между обнаруженным ранее на ПАТАН-600 компонентой активных

областей - "дециметрового гало" с нетепловым излучением длительно существующих источников шумовых бурь.

Приводятся статистические зависимости отношения магнитного поля в переходном слое над пятенными источниками, полученного по радиоизмерениям, к напряженности магнитного поля на фотосфере (оптические данные) в активных областях в присутствии шумовых бурь и без них. В противовес общепринятым представлениям показано, что шумовые бури часто присутствуют и в активных областях со слабыми корональными магнитными полями.

В третьей главе представлены результаты сопоставления многоволновых спектрально - поляризационных наблюдений активных областей Солнца, выполненных на ПАТАН-600, с наблюдениями шумовых бурь на интерферометре VLA. При обработке использовались также данные радиогелиографа в Nancay и данные наблюдений в рентгеновском диапазоне, полученные со спутника YОНKОН. Обнаружен ряд свойств активных областей, связанных с шумовыми бурями, которые проявляются в спектре их радиоизлучения во время эволюции:

- 1) Момент инверсии знака круговой поляризации в микроволновом диапазоне не зависит от положения АО на диске по отношению к центральному меридиану;
- 2) Часто инверсия длится один или несколько дней, и потом излучение возвращается к первоначальному значению;
- 3) Инверсия или значительное уменьшение степени поляризации перекрывает небольшой диапазон частот (порядка 10%) и может происходить на одной или двух волнах при 5% частотном

разрешении, использовавшимся на панорамном анализаторе спектра (ПАС) РАТАН-600;

- 4) Во всех случаях инверсии знака поляризации с указанными особенностями при сопоставлении с наблюдениями в метровом диапазоне (по данным VLA или Nancaу) над этими активными областями были локализованы шумовые бури.
- 5) Узкополосность эффекта указывает на пространственную локализацию геометрического места эффекта.

Были проведены модельные расчеты по интерполяции фотосферных магнитных полей в корону, которые показали (для AR7794, Октябрь 28-31, 1994), что известное явление инверсии знака поляризации, возникающее вследствие прохождения излучения через область квазипоперечного магнитного поля (QT-область), не объясняет наблюдаемую нами узкополосную инверсию знака поляризации. В связи с тем, что наличие в активной области шумовых бурь и инверсии знака круговой поляризации имеет место лишь для некоторых из них одновременно, можно полагать, что оба явления физически взаимосвязаны общими процессами в магнитосфере активной области.

Инверсия поляризации может также происходить, если излучение на разных частотах в локальном источнике возникает на разных высотах и при разных температурных градиентах. Кроме того, вследствие разницы в путях распространения, излучение от одних частей локального источника может претерпевать инверсию при прохождении через QT- область, тогда как от других нет.

Интерпретация, основанная на анализе полученных результатов, показывает, что физическая связь между двумя

явлениями - шумовые бури и неоднократной инверсией знака круговой поляризации, состоит в следующем:

1. Многоарочная структура в магнитосфере активной области ограничивает область открытых магнитных полей и, таким образом, препятствует высвобождению ускоренных частиц (места аккумуляции энергии).
2. Сложные магнитные структуры с пересечением полей в короне могут быть источником ускоренных частиц, необходимых для генерации излучения шумовых бурь (места высвобождения энергии).

Приведены примеры совместных наблюдений на РАТАН-600 и VLA, на которых основано вышесказанное предположение.

В четвертой главе представлены наблюдения активной области, связанной с волокном в центре диска Солнца 24-25 сентября 1996 года и протуберанцем на западном лимбе 4 октября 1996 года во время выполнения комплексной программы по наземной поддержке европейского спутника SOHO. При наблюдениях на западном лимбе впервые был получен детальный спектр радиоизлучения протуберанца на высотах до 200000 км в интенсивности и круговой поляризации в широком диапазоне волн 1.8 см - 16 см в одновременных наблюдениях. Это является важным, поскольку до сих пор в литературе имеются данные лишь о синтезированных спектрах протуберанцев, полученные на разных инструментах в разное время.

Обнаружена многокомпонентная высотная структура протуберанца. Проведено отождествление обнаруженных компонент протуберанца:

- с волокном - по данным обсерватории Маунт Вильсон в линии H_{α} и картам радиогелиографа в Nobeyama.
- с корональной аркадой - по данным спутника YОНKОН в линиях мягкого рентгена,
- с корональным стримером - по данным спутника SOHO, LASCO-C1, Fe IV.

Для проведения тонкого спектрального и пространственного анализа структуры была разработана методика выделения источников на лимбе Солнца. Она основана на использовании стабильных параметров инструмента и аппаратуры и выделении систематических погрешностей. В результате применения этой методики получены детальные спектры потоков и яркостных температур для всех компонент. При измерении круговой поляризации впервые для крупных инструментов реализована высокая точность измерения степени круговой поляризации (до 0.3 % на лимбе и 0.03% при измерениях на диске). В данных наблюдениях в коротковолновой части спектра на волнах до 3 см зарегистрирована степень поляризации 3%, что соответствует величине магнитного поля 50 ± 5 Гс.

Первый источник А (нумерация соответствует высоте над лимбом) соответствует области локализации волокна, его температура около 7000 К (по наблюдениям Nobeyama), однако спектральные наблюдения ПАТАН-600 обнаруживают существование более сложной структуры. Этот источник состоит из двух близких по высоте, но физически различных компонент. Первая компонента А' является конгломератом холодного вещества с температурами около 7000 К и 10000 К, в соответствие с

известными оптическими моделями волокон. Напротив, другая компонента А'' не имеет аналога в оптических, УФ и рентгеновских наблюдениях.

Второй источник В, имеющий оптически тонкий спектр радиоизлучения, отождествлен с излучением корональной аркады.

Третий источник С, также оптически тонкий, отождествлен с излучением коронального стримера.

Проведенное отождествление всех основных компонент протуберанца с оценкой их физических параметров позволяет предположить, что характеристики второго компонента источника А соответствуют области длительного аномального энерговыведения в области пересоединения полей во внешней части волокна и внутренней области корональной аркады в соответствии с гипотезой об устойчивых типах спиральности волокон.

В заключении диссертации сформулированы основные результаты работы.

Основные результаты диссертации.

1. Разработан и внедрен комплекс программ обработки многочастотных наблюдений Солнца на ПАТАН-600.
2. Разработана и внедрена методика учета инструментальных погрешностей при измерении предельной степени поляризации (0.3% на лимбе и 0.03% на диске Солнца).
3. На основе программно-методических разработок автора проведен ряд исследований тонкой структуры поляризации в АО в атмосфере Солнца:

- а) получена статистическая зависимость напряженности магнитного поля в активных областях, связанных с наличием или отсутствием шумовых бурь.
- б) обнаружены тонкие изменения спектральной структуры круговой поляризации микроволнового излучения, связанные с шумовыми бурями.
4. В радиодиапазоне по многоволновым наблюдениям на лимбе обнаружена многокомпонентная высотная структура протуберанца. В результате проведенного отождествления структуры протуберанца и реализации высоких координатных и поляризационных точностей измерены параметры волокна, корональной аркады и стримера.

Обнаружен новый тип радиоисточника на границе волокна и корональной аркады, не имеющего аналога в других диапазонах. Характеристики этого источника соответствуют области длительного аномального энерговыделения в местах пересоединения магнитных полей во внешней части волокна и внутренней области.

Список публикаций по теме диссертации

1. Гараимов В.И.: Обработка массивов одномерных векторов данных в ОС Windows. Программа Work Scan - версия 2.3, Препринт САО РАН 127Т, Нижний Архыз, 1997.
2. Bogod V.M., Borovik V.N., Garaimov V.I., Gelfreikh G.B., Korzhavin A.N.: Magnetic fields in the solar corona as found from high spectral polarization and spatial resolution radio observation with

RATAN-600 radiotelescope. IAU Collog.144, VEDA Publishing Company Bratislava-Printed in Slovakia, 1994, p.53.

3. Abramov - Maksimov V.E., Borovik V.N., Bogod V.M., Gelfreikh G.B., Garaimov V.I., Korzhavin A.N.: Magnetosphere of the Active Region Based on Multifrequency Solar Observations with New Panoramic Spectra Analyzer on RATAN-600. XXIV General Assembly of the URSI, Kyoto, Japan, August 25 - September 2, 1993. Abstracts booklet, Kyoto, 1993, p.468.
4. Borovik V., Gelfreikh G., Bogod V., Garaimov V., Korzhavin A.: Magnetospheres of the solar active regions from observations at microwaves, Workshop on coronal magnetic energy releases, Caputh (near Potsdam), Germany, May 16-20, 1994, p.39, 1994.
5. Bogod V.M., Garaimov V.I., Gelfreikh G.B., Lang K., Willson R., Kile J.N.: Noise Storms and the Structure of Microwave Emission of the Solar Active Regions. Solar Phys., p.216, v.133, 1995.
6. Bogod V., Garaimov V., Gelfreikh G., Lang K., Willson R.: Detailed spectral, polarization, and spatial analysis of solar active regions using the RATAN-600 and VLA observations, Workshop on coronal magnetic energy releases, Caputh (near Potsdam), Germany, May 16-20, 1994, p.25.
7. Боровик В.Н., Богод В.М., Ватрушин С.М., Опейкина Л.А., Цветков С.В., Шатилов В.А., Гараимов В.И.: Активные области на Солнце в день солнечного затмения 11 июля 1991 года по наблюдениям на РАТАН-600. Проблемы солнечной активности-1992. Пространственно временные аспекты солнечной активности. Санкт-Петербург 1992, ФТИ РАН, с.189.
8. Borovik V.N., Enome S., Medar V.G., Garaimov V.I., Komarov V.V.: Quiet Sun in the range 2-32 cm during 11-year sunspot cycle from

observations with RATAN-600 radiotelescope. Conference "Radio Emission from the Stars and the Sun", Barcelona, Spain, July 1995, p.50.

9. Боровик В.Н., Богод Д.В., Медарь В.Г., Гараимов В.И.: Корональные Магнитные поля над униполярными пятнами., XXVI Радиоастрономическая конференция, Сестрорецк, сентябрь, 1995, стр.154.
10. Bogod V.M., Grebinskij A.S., Garaimov V.I.: The study of prominence fine structure during RATAN-600 - SOHO support programme in sept.-oct. 1996, Solar Physics Letters, (submitted in 1997, SOLA 7354-S); (submitted to JOSO Annual Report'97, Kluwer Academic Publishers).
11. Bogod V.M., Grebinskij A.S., Garaimov V.I.: The Study of Fine Structure of Prominence using Multiwave Radio Observations and Satellite Data, 2-nd ASPE, Final Programme and Abstracts, p.54, Preveza, 1997.
12. Borovik V.N., Garaimov V.I., Medar V.G.: Coronal Magnetic Field Above Unipolar Sunspots Based on RATAN-600 Radio Observations, 2-nd ASPE, Final Programme and Abstracts, p.42, Preveza, 1997.
13. Alissandrakis K., Bogod V.M., Garaimov V.I., Gelfreikh G.B., Zheleznyakov V.V., Zlotnik E.Ya.: Unusual Inversion of polarization in Sunspot Associated Microwave Sources: RATAN-600 Observation and their Interpretation. (1997, JOSO Annual Report'97, Kluwer Academic Publishers),(2-nd ASPE, Final Programme and Abstracts, p.44, Preveza, 1997).
14. Bogod V.M., Garaimov V.I., Gelfreikh G.B., Willson R.F., Kile J.N., Lang K.R.: Microwave Spectral-Polarization Structure of Type I Noise Storm-Producing Active Regions on the Sun, Abstracts, and

Paper to be published in Proceedings of Workshop «The Tenth Cambridge Workshop on Cool Stars, Stellar Systems and the Sun», July 15-19, 1997, Cambridge, Massachusetts, Harvard- Smithsonian Center for Astrophysics.

15. Bogod V.M., Garaimov V.I., Grebinskij A.S.: High Accuracy Measurements of Prominences Polarization Emission at Radio Wavelengths Using RATAN-600 Observations, 1997, XXIII Assembly of IAU, Kyoto, Abstract book, JD19-014P, p.104.
16. Абрамов-Максимов В.Е., Боровик В.Н., Вьяльшин Г.Ф., Гельфрейх Г.Б., Медарь В.Г., Богод В.М., Гараимов В.И.: О высотном распределении магнитного поля над пятном по данным оптических и радиоастрономических наблюдений, 1996, Изв. ВУЗов, «Радиофизика», том. XXXIX, N 11-12, стр. 1436-1442.
17. Богод В.М., Гребинский А.С., Гараимов В.И.: Многокомпонентная структура протуберанца по многоволновым наблюдениям на РАТАН-600, 1997, «Проблемы современной радиоастрономии», Т.2, стр.6-7, С. Петербург.
18. Богод В.М., Гараимов В.И., Гельфрейх Г.Б., Ланг К.Р., Вильсон Р., Кайл Д.: О связи инверсии круговой поляризации микроволнового излучения с излучением шумовых бурь, 1997, «Проблемы современной радиоастрономии», Т.2, с.122, С. Петербург.
19. Богод В.М., Гараимов В.И., Тохчукова С.Х., Шатилов В.А.: Повышение точности поляризационных наблюдений на РАТАН-600., 1997, «Проблемы современной радиоастрономии», Т.3, с.40, С. Петербург.
20. Богод В.М., Гараимов В.И., Комар Н.П., Шатилов В.А.: Панорамный анализатор спектра РАТАН-600. Состояние и

перспективы развития., 1997, «Проблемы современной радиоастрономии», Т.3, с.132, С. Петербург.

21. Гараимов В.И., Богод В.М.: Система обработки многоканальных наблюдений Солнца на РАТАН-600, 1997, «Проблемы современной радиоастрономии», Т.3, с.137, С. Петербург.

22. Bogod V.M., Gelfreikh G.B.: Measurements of the Magnetic Field and the Gradient of Temperature in the Solar Atmosphere above a Flocculus using Radio Observations, *Solar Physics*, 1980, **67**, 29.

23. Gelfreikh G.B.: Radiomeasurements of coronal magnetic fields, IAU Colloquium 144 "Solar Coronal Structures", eds. V.Rusin, P.Heizel, 1994, Bratislava, p.21.

24. Priest E.R., 1982, *Solar Magnetohydrodynamics*, Reidel, Dordrecht, Holland.

25. Tandberg-Hanssen E., 1995, *The Nature of Solar Prominences*, Dordrecht, Kluwer Acad. Publ.

26. Demoulin P., Raadu M.A.: 1992, *Solar Phys.*, **142**, 291.

27. Kuijpers J.: A Solar Prominence Model, 1997, *ApJ Letters*, 489, L201.

28. Engvold O.: Cold matter in Filament Channels, 1994, *Proc. of the IAU Colloquium 144, "Solar Corona Structure"*, p. 297.

29. Leroy J.L.: Observations of Prominence Magnetic Fields, *Workshop on Dynamics and Structure of Solar Prominences*, (Ed Priest E R), Kluwer, Dordrecht, Holland, 1989, p. 77.

30. Kim I.S.: Prominence Magnetic Field Observations, *Proc. of IAU Coll, No 117, Hvar, SR Croatia, Yugoslavia* (Eds Ruzdjak V. and Tandberg-Hanssen E.), 1989, p. 49.

31. Martin S.F., Bilimoria R., Tracada P. W.: in *Solar Surface Magnetism*, ed. R J Rutten and C J Schrijver (Dordrecht: Kluwer Acad. Publ.), 1994, p. 303.

32. Богод В.М., Гельфрейх Г.Б.: Наблюдение активного протуберанца в сантиметровом диапазоне на РАТАН-600, *Письма АЖ*, 1978, **4**, 463.

33. Hanaoka Y., Kurokawa H., Enome S., Nakajima H., Shibasaki K. et.al.: Simultaneous Observations of a Prominence Eruption Followed by a Coronal Arcade Formation in Radio, Soft X-rays, and H- alpha, Publ. Astron.Soc. Japan 46, 1994, 205.
34. Хангильдин Ю.В.: Астроном. журн., 1964, **8**, 234.
35. Апушкинский Г.П., Топчило Н.А.: Астроном. ж, 1976, **20**, 393.
36. Buhl D., Tlamicha A.: Astron Astrophys, 1970, **5**, 102.
37. Hiei E., Ishiguro M., Kosugi T., Shibasaki K.: Coronal and Prominence Plasmas, NASA Conference Publ 2442, 1986, p 109.
38. Schmahl E.J., Bobrovsky M., Kundu M.R.: Solar Phys, 1981, **71**, 311.
39. Chiuderi Drago F., Felli M.: Solar Phys, 1970, **14**, 171.
40. Raoult A., Lantos P., Furst M. R.: Solar Phys, 1981, **71**, 311.
41. Schmahl E.J., Orrall F.Q.: Interpretation of the Prominence DEM for Three Geometries, NASA Conf. Publ. 24421 (Ed.: A.I.Poland), 1986, p.127.
42. Engvold O., Hansteen V., Kjeldseth-Moe O., Brueckner G.E.: The Prominence-Corona Transition Region Analyzed from SL-2 HSRT, Proc. of IAU Coll No 117, Hvar, SR Croatia, Yugoslavia (Eds Ruzdjak V. and Tandberg-Hanssen E.), 1989, p. 250.
43. Schmieder B., Poland A.I., Thompson B., Demoulin P.: Some Dynamical Aspects of a Quiescent Filament, Astron. and Astrophys., 1988, **197**, 281.
44. Einaudi G., Raadu M.A.: Thermal and Magnetic Instability of a Prominence, Workshop on Dynamics and Structure of Solar Prominences, (Ed. Priest E.R.), Kluwer, Dordrecht, Holland, 1987, p. 77.
45. Chiuderi Drago F.: Ultra-High Observations of the Prominence Corona Transition Region, in Proceedings of ESA Workshop on Solar

- Physics and Astrophysics at Interferometric Resolution, Paris 17-19 February 1992, p.49.
46. Гребинский А.С.: Депрессия радиоизлучения мелкомасштабных структур в области переходных температур солнечной атмосферы., Письма в Астроном. журн., 1987, **13**, N 5, с. 710.
47. Zirin H., Baumert B. M., Hurford G. J.: The Microwave Brightness Temperature Spectrum of the Quiet Sun, Ap.J, 1991, **370**, 779.
48. Chiuderi Drago F.: The Prominence-Corona Interface: Model and Observations, Proceedings of the First SOHO Workshop, Annapolis, Maryland, USA, 25-28 August 1992 (ESA SP-348, November 1992), p.177.
49. Athay R.G., Dere K.P.: Chromospheric and Transition Region Diagnostic using Emission-Line Intensities, 1991, Astrophys J, **379**, 776.
50. Kundu M. R., Melozzi M., Shevgaonkar R.K., 1986, Astron. Astrophys., **167**, 166.
51. Chiuderi C., Chiuderi Drago F.: Energy Balance in the Prominence-Corona Transition Region, 1991, Solar Phys., **132**, 81.
52. Корольков Д.В., Парийский Ю.Н., Соболева Н.С., 1958, Солнечные данные, No 9.
53. Гельфрейх Г.Б.: 1972, Астрономический циркуляр, No 699.
54. Гребинский А.С.: Об измерении магнитных полей во флоккулах. Астроном. журн., 1985, **62**, с.768.
55. Гребинский А.С.: Об измерении магнитных полей в солнечной хромосфере по поляризации тормозного радиоизлучения. Солнечные магнитные поля и корона. Труды XIII Консультативного совещания по физике Солнца, 1989, Новосибирск, Наука, **1**, с.132.

56. Апушкинский Г.П. и др: 1990, *Астрономический журн*, **67**, 5.
57. Klein K.-L.: *Suprathermal Electrons in Non-flaring Active Regions*, Submitted to Conference Series of Pacific in 1997.
58. Gelfreikh G.B., Peterova N.G., Ryabov B.I.: *Measurements of magnetic fields in solar corona as based on the radio observations of the inversion of polarization of local sources at microwaves*, 1987, *Solar Physics*, **108**, 89.
59. Смольков Г.Я.: 1974, Канд. Дис., ГАО АН СССР.

ГЛАВА 1. Система обработки данных многоволновых наблюдений Солнца на ПАС РАТАН-600 (Программа Work Scan).

Введение

Радиотелескоп РАТАН-600 более двух десятилетий используется в качестве инструмента для радиоастрономических исследований Солнца. За это время сменилось несколько поколений приемной аппаратуры, что влекло за собой замены систем регистрации и обработки наблюдений. Причинами развития систем обработки были: увеличение объема получаемых данных, требования к повышению оперативности обработки результатов наблюдений и сокращения времени для предоставления их сторонним пользователям, внедрение более современной вычислительной техники.

В период 1974-1981 гг. наблюдения Солнца проводились с помощью солнечного спектрально- поляризационного комплекса аппаратуры ССПК. Этот комплекс состоял из пяти радиополяриметров, работающих в диапазоне 2-4 см (волны 2.0,

2.3, 2.7, 3.2 и 4.0 см) с регистрацией интенсивности и круговой поляризации на каждой волне [2]. Низкочастотная часть радиополяриметров была выполнена в виде устройств автоматической регистрации УАР с аналоговыми выходами на самописцы типа КСП-4 и через 9-канальный коммутатор на 10-разрядный АЦП с последующей регистрацией на магнитную ленту [3]. Управление процессом наблюдения и обработка полученных результатов проводились наблюдателями вручную.

Данные на магнитной ленте в дальнейшем обрабатывались на ЭВМ серии ЕС с целью создания архива наблюдений.

Этот комплекс показал важность многоволновых наблюдений Солнца. На нем были получены первые результаты по радиогрануляционной структуре Солнца, по радиоизлучению флоккул. Осваивались методы измерения магнитного поля в атмосфере Солнца над пятнами [1].

Полученные результаты доказывали необходимость более широкого перекрытия по длинам волн в пределах рабочего диапазона РАТАН-600 для изучения ряда задач, связанных с активными областями (АО) на Солнце, что привело к разработке и внедрению в 1981 году нового автоматизированного ССПК - ИКАР-16 (интеллектуальный комплекс автоматической регистрации- 16-канальный). В расширенном комплексе ССПК добавились еще три волны 12 см, 20 см и 30 см [4]. Для проведения таких уже многоволновых наблюдений использовалась цифровая регистрация на стандарте КАМАК и мини-ЭВМ «Электроника-100И». Для обработки наблюдений использовалось программное обеспечение (ПО) на машинах серии ЕС, разработанное Андриановым С.А. [5].

Комплекс радиометров ССПК постепенно наращивался и число рабочих волн увеличилось (добавилось еще три диапазона волн: 0.8 см, 6.0 см и 8.0 см). Одновременно развивался и комплекс регистрации (ИКАР-24 [6] и ИКАР-32). Оперативная обработка осуществлялась на ЭВМ «Электроника-60» с помощью программ, созданных В.А. Шатиловым [7]. Этот комплекс проработал до 1991 года.

Опыт эксплуатации ССПК показал, что перекрытия столь широкого диапазона волн на отдельных частотных точках недостаточно для изучения тонкой спектральной структуры локальных источников (ЛИ) на Солнце. В то же время, Железняковым В.В. теоретически была показана возможность существования тонкой спектральной структуры радиоизлучения ЛИ как проявление излучения циклотронных линий [8] и других неоднородностей солнечной плазмы. Все это привело в 1989 году к созданию новой концепции приемного комплекса, который был реализован в 1991 году в виде ПАС (Панорамный Анализатор Спектра)[9].

Данный аппаратно - программный комплекс перекрывает диапазон волн 1.6 см - 32 см с регистрацией интенсивности и круговой поляризации радиоизлучения на 48 частотных каналах. Максимальное частотное разрешение достигает 5% от текущей частоты.

Все частотные каналы имеют единый фазовый центр и излучение из данной точки неба принимается одновременно во всем диапазоне частот ПАС. Весь диапазон разбит на 7 поддиапазонов: 1) 12-18 ГГц, 2) 8-12 ГГц, 3) 5.5 -8 ГГц, 4) 3.5 - 5.5 ГГц, 5) 2.5 -3.5 ГГц, 6) 1.5 -2.5 ГГц, 7) 0.9-1.2 ГГц. Такое

перекрытие обеспечивается применением специального облучателя, в котором реализовано совмещение всех поддиапазонов [17].

Структурная схема ПАС представлена на 8. Схема состоит из совмещенного 7-диапазонного входного облучателя, широкополосных модуляторов входных сигналов, широкополосного СВЧ - усилителя, многоканальной системы цифровой регистрации, компьютера с необходимой периферией и системой программного управления параметрами ПАС.

На входе ПАС используется совмещенный облучатель, имеющий единый фазовый центр для всех принимаемых частот. В зависимости от положения модулятора на вход усилителя подается излучение от эталонной управляемой нагрузки либо левая или правая круговые поляризации с выходов облучателя.

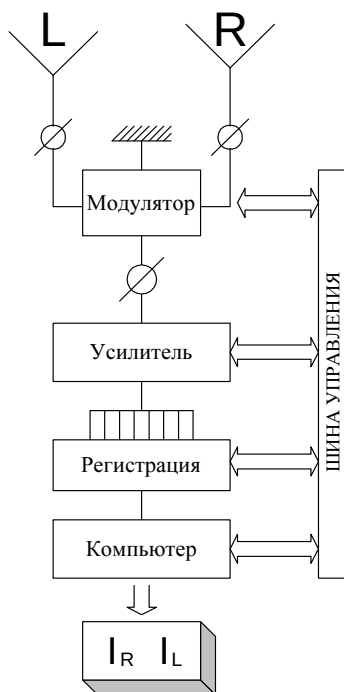


Рис. 1 Блок - схема панорамного анализатора спектра.

В дальнейшем, сигнал, пропорциональный разности интенсивностей каждой из круговых поляризаций и эквивалента, в определенной последовательности усиливается, фильтруется, детектируется и проходит в выходное низкочастотное устройство. Фильтрация сигнала осуществляется с помощью СВЧ мультиплексоров, которые из усиленного СВЧ сигнала одного диапазона выделяют 8 частотных каналов с расстоянием между центральными частотами соседних каналов около 5%. После усиления низкочастотной огибающей сигнала в выходном НЧ устройстве с помощью системы регистрации сигнал преобразуется в цифровой код. Далее в компьютере код преобразуется в цифровые

значения интенсивности правой и левой круговых поляризаций. Важной особенностью схемы ПАС является использование метода фазового кодирования входных сигналов, позволившего сократить вдвое число каналов в выходном НЧ устройстве [10]. Все функции по управлению усиления, синхронизации фазового кодирования и раскодирования сигналов осуществляются с помощью компьютера.

Для обеспечения работы комплекса ПАС были созданы два уровня ПО. Первый уровень (hardware) обеспечивает работу комплекса в автоматическом режиме наблюдений с управлением ряда параметров (ступенчатое переключение усиления в 2^8 раз, включение калибровочного сигнала, переключение постоянной времени, тестовые измерения)[9]. Второй уровень ПО (программа «PIRAT»[9]) обеспечивал обработку данных в интерактивном режиме. В дальнейшем В.А. Шатиловым была создана программа «SORTDOS» для оперативной обработки наблюдений.

Первые результаты использования ПАС продемонстрировали наличие тонких спектральных особенностей радиоизлучения локальных источников и позволили повысить точность измерения магнитного поля над пятнами по циклотронному механизму излучения до 2.5% [16].

Но все возрастающее число каналов и, в связи с этим, длительные задержки обработки данных тормозили процесс исследования (обработка одного многоволнового скана наблюдений на РАТАН-600 занимала около недели рабочего времени).

Последующее развитие комплекса ПАС привело к увеличению числа каналов (до 48), что еще более усугубило ситуацию с обработкой и делало невозможной передачу оперативной информации сторонним пользователям. С другой

стороны, при обработке наблюдений и сопоставлении их с данными других обсерваторий и космических аппаратов (SOHO, YONKON) требовался расширенный математический аппарат и необходимость использования общепринятых международных стандартов представления данных (FITS, PostScript). При этом помимо задач, связанных с детальной обработкой интересных образований, в последнее время стала актуальной задача ежедневной подготовки получаемых наблюдений для выставления их в компьютерную сеть Internet.

Все это послужило основой для создания нового программного обеспечения (ПО). В настоящей работе описывается ПО, основными требованиями к разработке которого были:

- быстрота обработки данных;
- неограниченность числа каналов;
- возможность быстрой передачи данных сторонним пользователям;
- развитый математический аппарат;
- открытость (возможность добавления новых функций обработки).

Необходимостью разработки специализированного ПО явилось использование целого ряда специфических функций, которые широко применяются в солнечных исследованиях (см. [11], [12], [13], [14], [15]). К ним относятся:

- необходимость одновременного представления многоволновых данных в большом динамическом диапазоне, ввиду многооктавного перекрытия (около 5 октав) по частотному диапазону;

- необходимость создания статистического профиля спокойного Солнца;
- сопоставление профилей наблюдаемых компонент источников на разных волнах и в разные дни;
- необходимость создания поляризационных спектров радиоисточников (параметра Стокса I,V и отдельно компонент I_R и I_L);
- необходимость учета специфики солнечных наблюдений в оптике и других диапазонах при сопоставлении результатов обработки и др.

Программное обеспечение обработки солнечных наблюдений на ПАС ПАТАН-600. Программа WorkScan.

Идеология программы

С целью реализации в программе дружественного графического интерфейса для удобной работы пользователя и в связи с распространением операционной среды Windows программа обработки **Work Scan** реализована в стандарте **Win32 (Windows95/NT)**. Программа написана на языке **C++** с поддержкой **Drag&Drop** для загружаемых данных.

Для реализации быстрого доступа к данным при их анализе и обработке, а также для возможности загрузки неограниченного числа каналов, хранение данных в программе осуществляется с помощью двухпроходной очереди динамически создаваемых структур. Каждая структура содержит данные наблюдений на одной частоте (в общем случае два ряда данных) и необходимую информацию для их обработки. Ограничение на размер загружаемых данных и их количество определяется лишь размером

физической памяти компьютера, на котором производится обработка. Для примера: размещение в программе всех данных одного наблюдения Солнца на ПАС РАТАН-600 (пятиминутная запись с постоянной времени 0.2 секунды на 40 частотах) требует около 1.5 MB оперативной памяти.

В структуре на каждый массив с данными (**Data**) создается рабочий массив (**Work**) с копией этих данных. Все функции обработки производятся над данными массивов **Work**. Это позволяет контролировать (а в случае необходимости отменять) любые операции обработки данных.

Существует набор функций, часто повторяющихся при обработке наблюдений Солнца. Использование существующих интерактивных программ, работающих одновременно с данными только на одной волне приводит к повторению ряда операций при обработке многочастотных наблюдений, что делает этот процесс длительным и утомительным. В программе **Work Scan** реализована возможность создания списка часто повторяющихся операций и использование его в дальнейшем как вызов одной функции. Так же в программе можно объединять выбранные сканы в группу и выполнять операции обработки над всей группой или всеми сканами, загруженными в программу. Использование описанных возможностей ускоряет в несколько раз процесс обработки наблюдений. При необходимости в программу **Work Scan** можно добавлять собственные функции обработки через разработанный интерфейс подключения динамических библиотек (см. Приложение А).

Общий вид окна программы **Work Scan** представлен на 2.

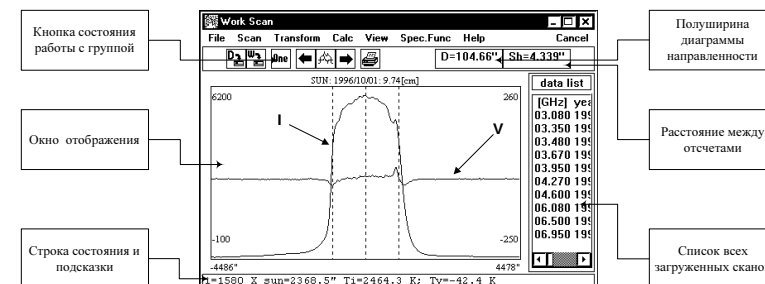


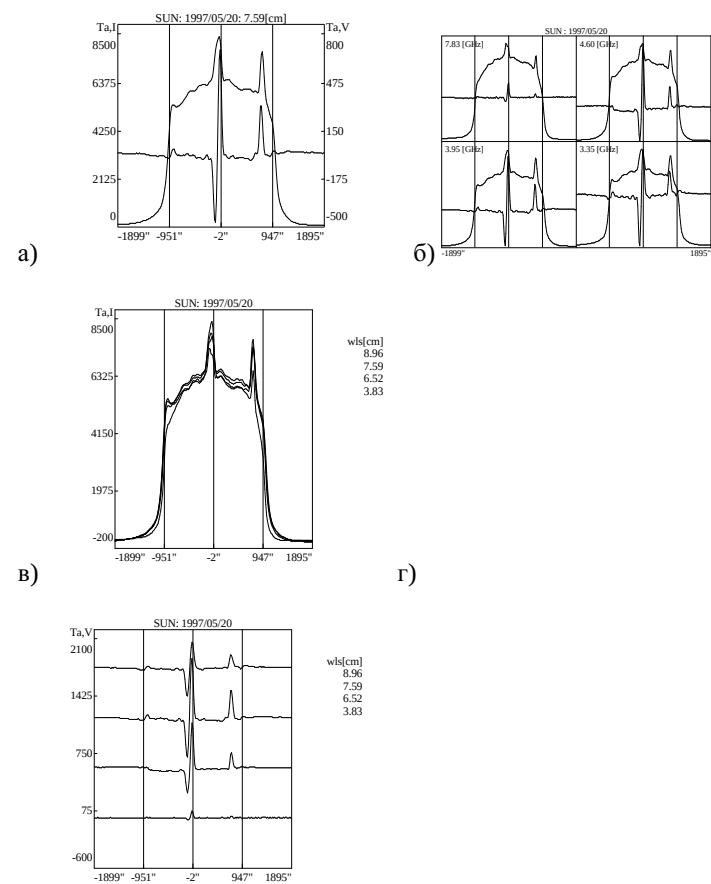
Рис. 2 Общий вид окна программы **Work Scan** при работе с одной длиной волны в интенсивности **I** и круговой поляризации **V**

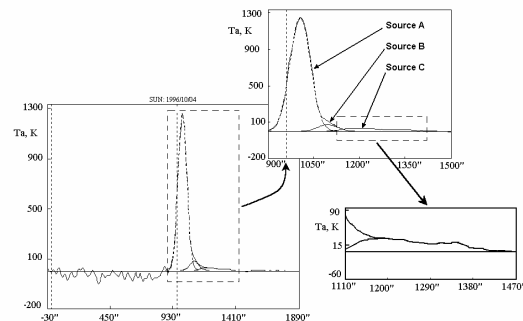
При работе программы **Work Scan** в окне отображения можно показать любой выбранный (активный) скан, его часть или выбранную группу сканов (см. 2). Разные виды представления сканов позволяют быстро проводить визуальный многочастотный анализ спектра и структуры источников радиоизлучения, что облегчает выбор функций их дальнейшей обработки. В общем случае <скан> состоит из двух последовательностей данных, описывающих состояние поляризации радиоизлучения **R** и **L** или **I** и **V**, каждая из которых, в свою очередь, представлена двумя массивами [**Data**, **Work**]. При этом слева и справа от скана будут отображаться шкалы отсчетов для разных поляризаций. Если курсор находится в окне отображения, то при нажатии левой кнопки мыши в строке состояния отображаются:

- номер отсчета массива, соответствующий положению курсора,
- координата курсора относительно центрального значения массива (для Солнца - относительно его центра) в единицах измерения горизонтальной шкалы,
- значения отсчетов положения курсора в единицах вертикальных шкал.

С помощью горизонтального перемещения курсора в окне отображения, при нажатой правой клавиши мыши, можно выбрать участок скана для более детального представления (см. 1д). При этом в строке состояния будет отображаться размер выделенного участка скана.

Выбор активного скана осуществляется с помощью кнопок $\Leftarrow \Rightarrow$ на панели инструментов (ToolBar) или через служебную панель со списком всех загруженных сканов (data list) (см. 2).





д)

Рис. 3 Варианты представления сканов в программе **Work Scan**. а) представление скана Солнца на одной частоте в интенсивности I и круговой поляризации V ; б) раздельное представление группы из четырех сканов (вариации от двух до девяти); в) совмещенное по координатам представление группы сканов (до сорока) в одном масштабе; г) совмещенное по координатам представление группы сканов (до сорока), разнесенных для наглядности по высоте; д) представление многокомпонентной структуры АО в разных масштабах.

Любое изображение, представленное на экране во время обработки, можно вывести на принтер или сохранить в цветном **WMF** (Windows Metafile) или черно-белом **PS** (Post Script) форматах. Использование формата **WMF** позволяет вставлять полученные изображения в графические текстовые процессоры типа Microsoft Word. Post Script формат является международным стандартом передачи изображений, что дает возможность передавать их сторонним пользователям. Для реализации возможности передачи цифровых данных наблюдений сторонним пользователям программа сохраняет данные в файлах **FITS**-формата (см. Приложение В). Данный формат файлов является и форматом входных данных. Для возможности выборки данных из серии многочастотных наблюдений разных источников за разные периоды для последующей обработки в программе **Work Scan**

создана вспомогательная программа **Chooosed Scan**. Эта утилита написана в операционной среде Windows. Она позволяет делать выборки из набора данных многочастотных наблюдений по комбинациям следующих параметров: объект наблюдения, частота наблюдения, дата наблюдения, время наблюдения (см. Приложение С).

Анализ загруженных в программу сканов на разных частотах и их просмотр в различных масштабах в двух поляризациях позволяет выбрать объект для детальных исследований и необходимый математический аппарат дальнейшей обработки. Все функции, выполняемые программой, выбираются из меню главного окна программы.

Обработка данных

Калибровка данных и их коррекция

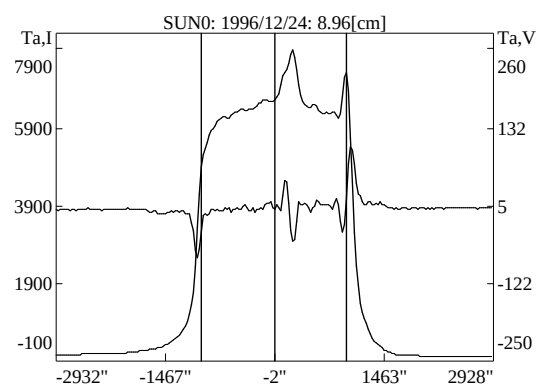
Наблюдения Солнца на РАТАН-600 с 1992г. выполняются на ПАС. Для наблюдений используется антенная система телескопа в режиме совместной работы Южного сектора (круговой отражатель) и Перископа (плоский отражатель). Внутри этой системы находится третье зеркало в виде несимметричного параболического цилиндра [18]. В его фокусе располагается широкополосный совмещенный

облучатель. Для адекватной привязки данных по координатам и калибровки по потокам радиоизлучения первоначально необходимо провести коррекцию различных инструментальных искажений, возникающих в системе антенны и приемной аппаратуры.

Коррекция инструментальных искажений

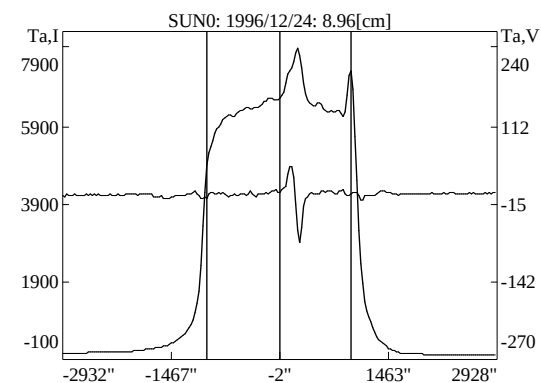
Антенная система РАТАН-600 имеет несколько типов поляризационных искажений инструментального характера, детально рассмотренных в главе 4. Здесь же следует отметить, что они возникают вследствие пространственного смещения диаграмм направленности радиотелескопа по правой и по левой круговым поляризациям. В результате, появляющиеся, так называемые, кросс - поляризационные искажения, приводят к некоторому продольному сдвигу источников на регистрируемых записях.

До коррекции



а)

После коррекции



б)

Рис. 4 Пример коррекции инструментального кросс - поляризационного сигнала. Здесь: а) Запись Солнца с искажениями по круговой поляризации (показана в центре). Видны пики в поляризации на лимбах Солнца. б) Тоже, после коррекции. Величина пиков уменьшилась в 10 раз.

Для восстановления записей от влияния упомянутых инструментальных погрешностей в программе **Work Scan** реализованы следующие функции: а) сдвиг скана на данной частоте на определенное, заранее известное или рассчитанное, число точек относительно сканов на других частотах; б) сдвиг скана с левой поляризацией относительно скана с правой поляризацией на определенное, заранее известное или рассчитанное число точек. Данные процедуры позволяют проводить коррекцию инструментальных поляризационных погрешностей по известным значениям горизонтального разнеса диаграмм правой и левой круговых поляризаций. Значения величин разнесов вычисляются из наблюдений точечных опорных источников. Если же данные

величины неизвестны, то программа позволяет производить автоматическую коррекцию этих поляризационных искажений.

7 демонстрирует функцию автоматической коррекции кросс - поляризационных искажений.

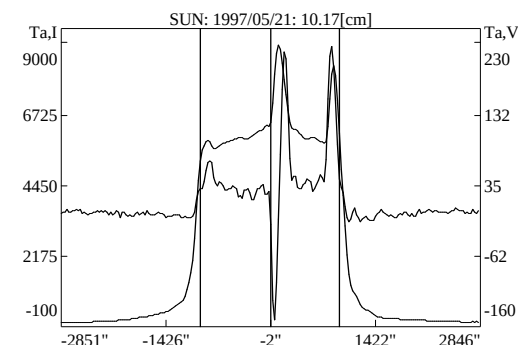
Коррекция второго типа инструментальных искажений в каналах поляризации

Следующий тип инструментальных искажений связан с наличием в каналах круговой поляризации V дополнительного (паразитного) сигнала, пропорционального интенсивности I . Причинами возникновения данного сигнала являются:

- различия в величинах потерь сигнала в трактах по правой и левой круговым поляризациям от облучателя до модулятора;
- несимметричность облучения по правой и левой круговым поляризациям для каждой волны многоволнового облучателя;
- кросс - поляризационные искажения антенной системы.

Программа **Work Scan** позволяет корректировать данный вид ошибок регистрации путем добавления сигнала интенсивности, умноженного на выбранный коэффициент k , в данные сигнала поляризации $V_{cor} = V_{er} + k I$

До коррекции



После коррекции

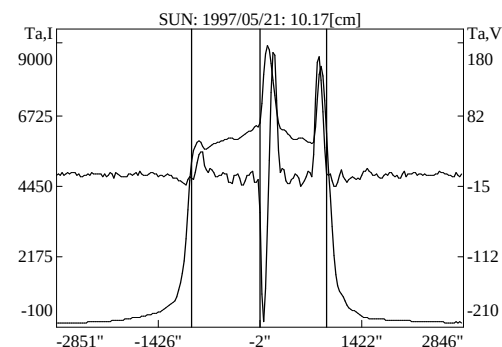


Рис. 5 Пример коррекции скана поляризации V от сигнала, пропорционального интенсивности I .

Реализован автоматический вариант данной функции. Он основан на вычислении корректировочного коэффициента из условия равенства полных потоков Солнца для сканов правосторонней R и левосторонней L поляризаций. Точность данного метода для источника с полным потоком 10 с.е.п. и

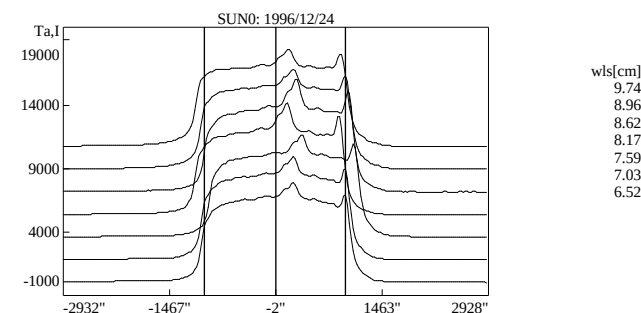
поляризацией 50% на волне 2 см лучше 1% (в большинстве случаев точность метода лучше) (см. п).

Определение центра диска Солнца на многоволновых регистрациях

Алгоритм автоматической коррекции сдвигов поляризационных сканов основан на определении центра записи Солнца из условия равенства абсолютных значений производных на краях записи Солнца. В предшествующих программах обработки (Шатилов [7], Цветков [9]) центр записи Солнца определялся как середина между положениями точек с максимальными значениями производных на краях Солнца. Однако, при наличии на лимбах Солнца восходящих или заходящих источников радиоизлучения регистрируемый от них сигнал дает существенный вклад в значения производных на краях Солнца. Это вносит заметные ошибки в определение положения центра записи Солнца.

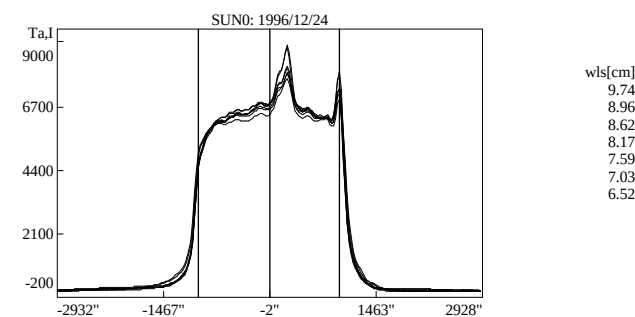
В программе **Work Scan** реализована модификация данного метода следующим образом. Она основана на сравнении значений производных участков на краях записи Солнца, связанных с вкладом диаграммы одного отражательного элемента (щита) антенны. Этот метод, практически, не зависит от наличия источников радиоизлучения на краю Солнца, т.к. размер диаграммы одного щита больше чем размер всего Солнца. Однако, он чувствителен к несимметричности боковых лепестков диаграммы направленности антенной системы. Точность метода составляет половину расстояния между отсчетами записи (при постоянной времени 0.2 секунды центр записи Солнца определяется с точностью 1.5-2 угловых секунды). На 1 показан пример центрирования записей Солнца на разных частотах.

До коррекции



а)

После коррекции



б)

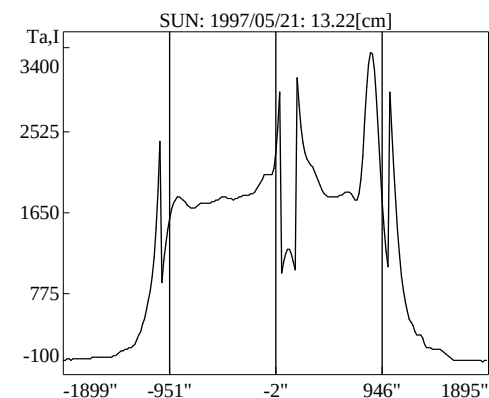
Рис.6 Пример центрирования группы сканов. Здесь: а) Приведены регистрации на нескольких волнах, смещенные по оси x относительно друг друга. б) Регистрации совмещены и представлены в едином масштабе.

Автоматическая коррекция усиления

Регистрация столь яркого и динамического объекта как Солнце требует реализации большого динамического диапазона (более чем 1000:1). Ситуация осложняется еще и тем фактом, что при регистрации радиоизлучения Солнца в широком частотном диапазоне (около 5 октав) характер спектров источников сильно меняется. В связи с этим в ПАС реализован процесс автоматического изменения коэффициента усиления по высокой и низкой частотам на каждом из поддиапазонов независимо. Величина дискретного изменения усиления реализована в $2^8=256$ раз, с точностью до 1-2%. Однако, реальная точность в процессе эксплуатации комплекса меняется (в виду некоторого изменения усиления), что усложняет процесс восстановления данных наблюдений.

В программе **Work Scan** реализована функция автоматического восстановления записи с учетом изменений при переключении усиления аппаратуры во время наблюдений. Данная функция основывается на аппроксимации кривой в месте переключения линейной функцией с учетом уменьшения влияния ошибок шумовой дорожки записи (см. г). Применение данного алгоритма позволяет восстанавливать данные наблюдений с точностью, лучшей 0.1%.

До коррекции



После коррекции

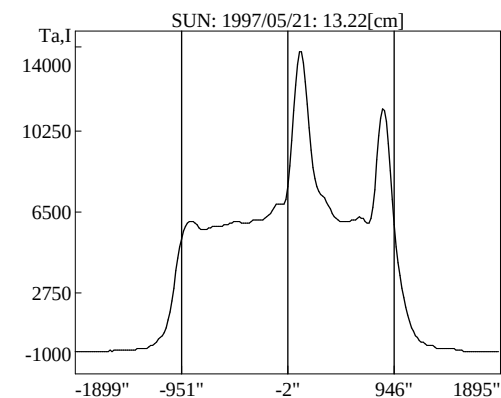


Рис. 7 Пример программного восстановления данных наблюдений от переключений усиления аппаратуры ПАС.

Автоматическая калибровка записей

В программе **Work Scan** реализованы три функции калибровок записей радиоизлучения Солнца:

- калибровка по табличным значениям антенной температуры спокойного Солнца [19];
- калибровка с использованием записей калибровочных сигналов с последующей привязкой к опорным источникам типа Краб, Луна;
- калибровка по данным полных потоков Солнца по наблюдениям обсерваторий службы Солнца (Тоюкава). Данная функция производит интерполяцию значения потока на момент времени наблюдения на РАТАН-600 и учитывает весовой вклад вертикального размера диаграммы телескопа. Этот метод калибровки чувствителен к вспышечной активности Солнца.

Анализ структуры радиоисточников

При обработке данных наблюдений Солнца решаются следующие задачи: а) разделение записей на крупномасштабные и мелкомасштабные компоненты (включая выделение шумовой дорожки и удаление импульсных помех); б) выделение уровня спокойного Солнца и S - компоненты; в) анализ многокомпонентной структуры и получение физических характеристик радиоисточников.

Автоматическая чистка регистраций от промышленных помех

Для выделения из сканов крупномасштабных и мелкомасштабных компонент в программе **Work Scan** реализованы

функции фильтрации данных с помощью гауссового и медианного фильтров (см. п) с различными окнами сглаживания. Кроме того, в программу добавлены функции робастного сглаживания, разработанные В.С. Шергиным [20], с использованием интерфейса подключения динамических библиотек функций (см. в).

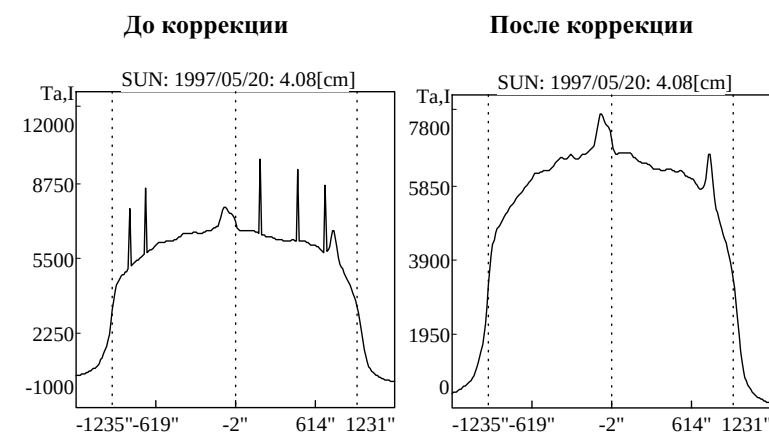


Рис. 8 Пример чистки импульсных помех с помощью медианного фильтра

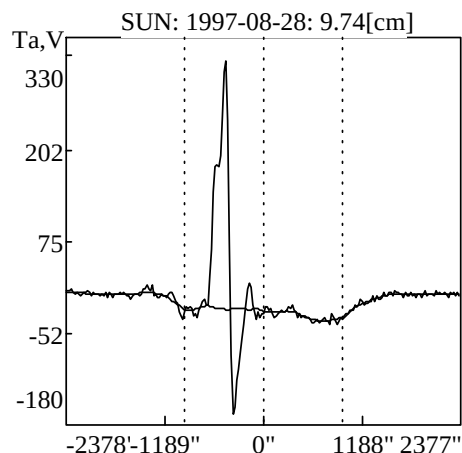


Рис. 9 Пример выделения фона с использованием робастного фильтра

Выделение уровня спокойного Солнца

Выделение уровня спокойного Солнца с высокой степенью точности (порядка нескольких процентов) до сих пор является нерешенной задачей. Отчасти, это связано с самим понятием уровня спокойного Солнца и отражает степень активности хромосферы, переходной зоны и нижней короны от циклы активности. Существенна также зависимость этого уровня от длины волны.

Для периодов минимума солнечной активности В.Н. Боровик [19] получен статистический профиль на ряде волн сантиметрового и дециметрового диапазонов. Однако, для периодов, связанных с максимумом активности, проведение такого уровня зависит, в основном, субъективно от задач пользователя. В связи с этим, в программе Work Scan реализовано несколько функций облегчающих выделение S- компоненты:

1. Реализована функция вычитания из скана шаблона профиля Солнца или скана за другой момент времени наблюдений.
2. Реализована аппроксимация участка записи кубическим сплайном с разными критериями жесткости, проходящим через выбранные пользователем точки. Данная процедура помогает провести фон на записи по точкам, определенным пользователем (см. 'а).
3. Реализована функция получения статистической кривой нижней огибающей сканов за выбранный период. Данная функция позволяет получать профиль излучения неактивного Солнца за период прохождения активной области по диску.
4. Реализована возможность использования спокойных участков записи края диска Солнца для изучения восходящих или заходящих источников на противоположном краю солнечного диска (см. 'б).

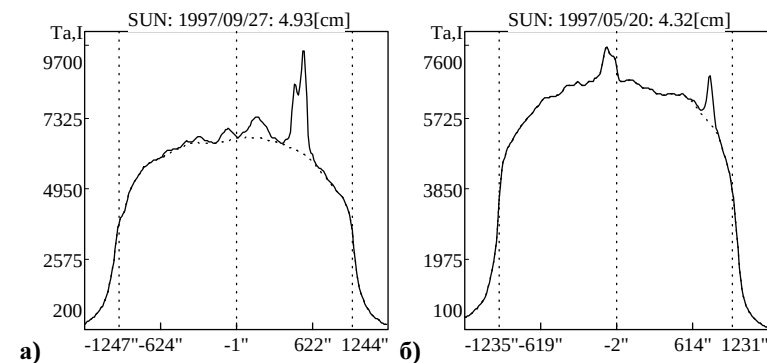


Рис. 10 Примеры выделения фона: а) с использованием функции кубического сплайна, б) с использованием спокойных участков записи края диска Солнца

Автоматический гаусс-анализ структуры радиоисточников

Задача анализа структуры радиоисточников сводится к выделению компонент излучения АО и получению физических параметров каждого из них. К физическим характеристикам относятся: одномерная координата радиоисточника, величина потока его радиоизлучения, размер источника.

Для этой цели в программе **Work Scan** имеются функции автоматического и интерактивного гаусс- анализа. Данные функции позволяют разделить радиоизлучение АО на источники в форме гауссиан и одновременно получить следующие характеристики этих источников: положение центра источника, его полуширину, поток радиоизлучения от этого источника и яркостную температуру источника в предположении его круговой симметрии.

Функция автоматического гаусс- анализа может работать как с одним сканом, так и с группой. Параметрами этой функции являются общее количество гауссиан и количество гауссиан, положение которых указывает пользователь. За основу данной функции взята программа, разработанная Ивановым Л.Н. [21].

Функция интерактивного гаусс- анализа позволяет пользователю вписывать гауссианы самому, а так же корректировать работу функции автоматического гаусс- анализа. Пример работы функций показан на **ж**.

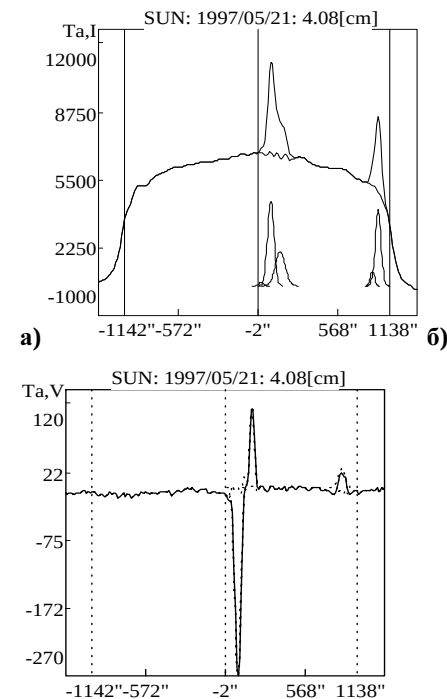


Рис. 11 Определение параметров источников методом гаусс-анализа

В программе введена также функция, которая вычисляет поток радиоизлучения от участка записи. Это позволяет вычислять и полный поток радиоизлучения АО одновременно на ряде длин волн.

В результате, приведем список основных функций обработки многоволновых наблюдений радиоизлучения Солнца на ПАС радиотелескопе РАТАН-600, которые реализованы в программе **Work Scan**:

- автоматическое исправление различных (нефатальных) дефектов записи,

- автоматическая коррекция усиления многоволновых регистраций;
- автоматическая коррекция различных инструментальных искажений;
- свертка с различными сглаживающими фильтрами, гаусс-анализ многоволновых записей;
- автоматическая калибровка многоволновых записей;
- автоматическое центрирование многоволновых сканов, по производной на краях Солнца (Луны);
- центрирование сканов, полученных в разное время и с разным временным шагом;
- получение нижней огибающей или среднего скана по данным наблюдений за несколько дней;
- оценка ряда параметров локальных источников (ЛИ) радиоизлучения активных образований (АО), таких как одномерная координата, величина потока радиоизлучения, размер источника, с использованием метода гаусс-анализа [21] для разделения радиоизлучения АО на компоненты, соответствующие отдельным ЛИ радиоизлучения.

Выводы

В главе приведено описание разработанного автором комплекса программ **Work Scan**, используемых для обработки многоволновых наблюдений Солнца на ПАС РАТАН-600. Концепция комплекса основана на сочетании интерактивного и автоматического режимов обработки астрономических данных.

Реализованы функции коррекции различных типов инструментальных искажений наблюдений, что позволило достичь

предельных точностей в измерениях физических параметров радиоисточников.

Реализована возможность адаптации данного комплекса под требования конкретного пользователя. Для этого предусмотрена возможность введения дополнительных функций обработки.

Эффективность работы этих программ значительно ускорила и облегчила процесс обработки наблюдений, что позволило ежедневно представлять данные наблюдений Солнца на РАТАН-600 в сети **Internet** (адрес: <http://www.sao.ru/~sun> или на сервере спутника SOHO <http://sohowww.nascom.nasa.gov/data/synoptic>).

Разработанное программное обеспечение для обработки и представления многочастотных данных наблюдений используется в настоящее время в группе СИ на РАТАН-600, в СПб Филиале САО, в ГАО, в Риге (радиоастрономическая обсерватория), ИСЗФ (Иркутск), в США (Тафтский университет).

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А Подключаемые библиотеки

Во время работы программа **Work Scan** через элементы меню **Spec.Func** использует функции, находящиеся в динамических библиотеках в подкаталоге **STARTUP**. Пользователь может подключить к программе **Work Scan** собственные функции обработки данных, создав свою динамическую библиотеку и расположив ее в подкаталоге **STARTUP**. Для связи с библиотеками программа **Work Scan** использует структуру **SF_INIT** и вызовы функций: **InitSdllMenu** и **SelectDllFunction**.

```
struct SF_INIT
{
    int Npix;           //общее количество элементов массива Work
    int nbeg;           //номер начального элемента выделенного участка массива
                        //Work
    int nend;           //номер последнего элемента выделенного участка массива
                        //Work
    int FlagDialog;     //флаг инициализации диалога (при вызове функции равен
                        //TRUE)
    char *Object;        //ссылка на строку содержащую объект наблюдения
    char *DateObs;       //ссылка на строку содержащую дату наблюдения
    char *TimeObs;       //ссылка на строку содержащую время наблюдения
    float Frq;           //частота наблюдения
    float noise;         //заданный уровень шумов
    float xdel;          //шаг между отсчетами массива Work
    float *data;         //адрес начального элемента выделенного участка массива
                        //Work
    HWND hWnd;          //идентификатор главного окна программы
    int wParam;          //идентификатор выбранного элемента меню Spec.Func
    LPSTR txt;           //ссылка на текстовый массив (при входе в функцию равен
                        //NULL)
    char TitleEd[64];    //строка для инициализации заголовка окна редактора
                        //(пустая)
}
```

Если при выходе из функций динамической библиотеки **txt** не равен **NULL**, создается окно редактора с заголовком **TitleEd** и содержимым буфера **txt**. После этого буфер **txt** удаляется.

void InitSdllMenu(HMENU Menu, int Num) - функция инициализации меню **Spec.Func**. Вызывается при загрузке программы **Work Scan** в момент подключения динамической библиотеки. Имеет следующие параметры:

- **Menu** - указатель на меню **Spec.Func**,
- **Num** - число, необходимое при создании идентификаторов меню.

Пример функции:

```
void InitSdllMenu(HMENU Menu, int Num)
{
    HMENU menu=CreatePopupMenu();
    AppendMenu(menu,MF_STRING|MF_ENABLED,Num+ID_MENU1,"My
Func1");
    AppendMenu(menu,MF_STRING|MF_ENABLED,Num+ID_MENU2,"My
Func2");

    AppendMenu(Menu,MF_POPUP|MF_ENABLED,(UINT)menu,"MyDllFunc
");
}
```

Значения собственных идентификаторов (**ID_MENU1** и т.п.) должны находиться в промежутке от 1 до 99.

void SelectDllFunction(HINSTANCE hInst, struct SF_INIT *MyData) - функция вызова функций обработки данных, соответствующих выбранному элементу меню **Spec.Func**. Имеет следующие параметры:

- **hInst** - идентификатор модуля **Work Scan**,
- **MyData** - указатель на структуру **SF_INIT**.

Пример функции:

```
void SelectDllFunction(HINSTANCE hInst, struct SF_INIT
*MyData)
```

```

{
    int Nn,kk;
    float *data;
    Nn=MyData->nend-MyData->nbeg;
    kk=MyData->FlagDialog;
    data=MyData->data;
    if(kk)
    {
        DialogBox(...);
        MyData->FlagDialog=FALSE;
    }
    if(MyData->txt==NULL)
    {
        MyData->txt=new(char[1024]);
        strcpy(MyData->TitleEd,'My Work');
    }
    kk=MyData->wParam;
    switch(kk)
    {
        case ID_MENU1: MyFunc1(data, Nn);break;
        case ID_MENU2: MyFunc2(MyData);break;
    }
}

```

Приложение В Форматы записи данных

Программа **Work Scan** поддерживает три формата записи данных. Все форматы близки по форме или полностью соответствуют FITS-стандарту. Реализованы два различных подхода к структуре загружаемых данных:

1. Все данные находятся в одном FITS-файле (расширение - BINARY TABLE).

2. Каждый скан (в общем случае две поляризации) находится в отдельном файле. На вход программы подается файл со списком имен загружаемых файлов с данными.

Формат предыдущих версий и конвертора.

Это формат для хранения одного скана с наблюдениями в отдельном файле. Он не соответствует FITS-стандарту, но похож по структуре. Т.е. имеет FITS-образный заголовок, после которого идут данные. Программа **Work Scan** не сохраняет данные в этом формате. Файл с данными имеет следующую структуру:

```

SIMPLE =          F /      FILE DOES NOT CONFORM TO FITS STANDARD
BITPIX =          16 /      INTEGER WITH '(I2)' FORMAT
NAXIS =           1 /      NUMBER OF DATA AXES
NAXIS1 =          short /      LENGTH OF DATA AXIS 1
PMCSUN =          float /      POST MERIDIAN CENTER
DATE-OBS= 'dd/mm/gggg' /
TIME-OBS= 'hh:mm:ss.sss' / UT
OBJECT = 'Object' /
TELESCOP= 'Telescope' /
ORIGIN = 'Origin' /
RADIUS =          short /      OPTICAL SOLAR RADIUS (ARCSECOND)
AZIMUTH =          float /      Azimuth of observ.
ALTITUDE=          float /      Altitude of source
ANGLE =           float /      Angle of decl.
CDELTA1 =          float /      ARCSEC
N_POLAR =         2 /      NUMBER OF POLARIZATIONS [1 or 2]
CALIBR =          0 /      FLAG OF CALIBRATION [ 0-NO 1-YES ]
FLAG_IV =         1 /      IF 1 => R,L; IF 0 => I,V
COMMENT TQSUN - TEMPERATURE OF A SURFACE OF THE QUIET SUN AGREED WITH
THE COMMENT FORM OF THE DIAGRAM OF A ANTENNA AND KOEF.
OBS-FREQ=          float /      GHZ
THETA-DG=          float /      DIMENSION OF DIAGRAMM (ARCSECOND)
TQSUN =            short /      Ta[K]
FLUX_L =           float /      KOEF. Ta[K] -> FLUX[S.F.U.]
END
POLARIZ =          1 /      IF 1 - (R or R+L), IF 0- (L or R_L)
BSCALE =           float /
BZERO =            float /
END
data set\r\n
POLARIZ =          0 /      IF 1 - (R or R+L), IF 0- (L or R_L)
BSCALE =           float /
BZERO =            float /
END
data set\r\n

```

Формат хранения одного скана наблюдений.

Данный формат соответствует FITS-стандарту. Он является основным форматом программы. Файл данного формата имеет следующую структуру заголовка:

```
SIMPLE =      T / FILE DOES CONFORM TO FITS STANDARD
BITPIX =     64 / INTEGER WITH '(I8)' FORMAT
NAXIS  =      2 / NUMBER OF DATA AXES
NAXIS1 =   short / LENGTH OF DATA AXIS 1
NAXIS2 =      2 / LENGTH OF DATA AXIS 2
PMCSUN =   float / POST MERIDUM CENTER
DATE-OBS='gggg/mm/dd' /
TIME-OBS='hh:mm:ss.sss' / UT
OBJECT  = 'Object' /
TELESCOP='Telescope' /
ORIGIN  = 'Origin' /
RADIUS  =   short / OPTICAL SOLAR RADIUS (ARCSECOND)
AZIMUTH =   float / Azimuth of observ.
ALTITUDE=   float / Altitude of source
ANGLE   =   float / Angle of decl.
CDELTA1 =   float / ARCSEC
POLARSET=    1 / SET1: IF 1 (R or R+L), IF 0 (L or R-L)
CALIBR  =    0 / FLAG OF CALIBRATION [ 0-NO 1-YES ]
FLAG_IV =    1 / IF 1 => R,L; IF 0 => I,V
COMMENT TQSUN - TEMPERATURE OF A SURFACE ...
COMMENT FORM OF THE DIAGRAM OF ...
OBS-FREQ=   float / GHz
THETA-DG=   float / DIMENSION OF DIAGRAMM (ARCSECOND)
TQSUN  =   short / Ta[K]
FLUX_L  =   float / KOEF. Ta[K] -> Intensity[Jy/arc.sec.]
BSCALE1 =   float /
BZERO1  =   float /
BSCALE2 =   float /
BZERO2  =   float /
END
```

Формат хранения группы сканов.

Данный формат является расширением FITS-формата (BINARY TABLE). Он служит для хранения группы сканов в одном файле. В данном формате сохраняется не только любая группа сканов, но и выделенный участок записи. Файл имеет следующую структуру заголовка:

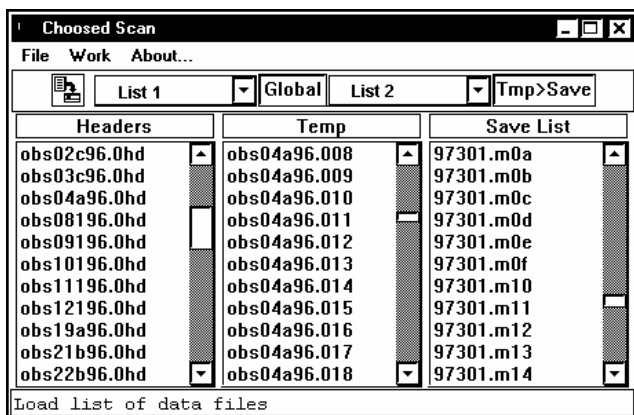
```
SIMPLE =      T /
BITPIX =     16 /
NAXIS  =      0 /
EXTEND  =      T /
COMMENT This table contains the set (TFIELDS) of 1-dimensional (TFORM#
COMMENT and TDIM#) full disk scans of the Sun at microwaves (TTYPE#)
```

```
COMENT .....
HISTORY This FITS file was created by the 'Work Scan' task.
END
...
XTENSION='BINTABLE' /
BITPIX  =      8 /
NAXIS   =      2 /
NAXIS1  =      long /
NAXIS2  =      1 /
PCOUNT  =      0 /
GCOUNT  =      1 /
TFIELDS =      short /
EXTNAME = 'SELECTED SOLAR RADIO SCANS' /
EXTVER  =      1 /
DATE    = 'dd/mm/gg' /
ORIGIN  = 'Origin' /
TELESCOP='Telescope' /
INSTRUME='Instrument' /
DATE_OBS='gggg-mm-ddThh:mm:ss.sss' /
SCI_OBJ = 'SYNOPTIC GROUND BASED DATA FOR SOHO' /
SCI_SPEC='MICROWAVE OBSERVATIONS' /
OBJECT  = 'Object' /
AZIMUTH =   float /
ALTITUDE=   float /
CENTRE_X=   float /
XSCALE  =   float /
ANGLE   =   float /
SOLAR_R =   float /
BUNIT   = 'JY/ARCSEC' /
TFORMi  = 'short' /
TDIMi   = '(short)' /
TTYPEi  = 'FREQUENCY float GHZ xxx' / xxx - (R or L or R+L or R-L)
TSCALEi =   float /
TZEROi  =   float /
END
```

Приложение С Утилита ChoosedScan

Утилита Choosed Scan позволяет из набора файлов с одиночными сканами наблюдений выделить серию (по любой комбинации следующих признаков *Объект, Дата наблюдения, Время наблюдения, Частота наблюдения*) для последующей загрузки в программу Work Scan.

Общий вид окна программы:



Главное окно программы состоит из трех списков (**Headers**, **Temp**, **Save List**)

Headers - список содержащий имена заголовочных файлов. При выделении строки списка в строке состояния отображается количество имен файлов с данными, содержащихся в данном заголовочном файле. Двойной щелчок левой клавиши мыши заполняет список **Temp** именами файлов с данными, содержащихся в данном файле заголовка.

Temp - рабочий список, содержащий имена файлов с данными, выбранными с помощью функций программы. При выделении строки списка в строке состояния отображаются параметры выбранного файла (*Объект, частота, дата и время наблюдения*). При двойном щелчке левой клавиши мыши выбранный файл копируется в список **Save List**.

Save List - список, содержащий имена выбранных файлов. Результатом сохранения программы является заголовочный файл, содержащий имена файлов, находящиеся в данном списке. При

двойном щелчке левой клавиши мыши выбранный файл удаляется из списка.

Приложение D Полное описание функций меню

Главное меню программы состоит из следующих полей:
[File | Scan | Transform | Calc | View | Spec.Func | Help | Cancel]

Ниже приводится полный список функций меню.

File

Open	Загрузка файла с данными.
Close	Удаление из программы всех загруженных файлов.
Append...	Добавление в программу файлов с данными.
Save Data	Сохранение массивов Data в исходных файлах (кроме BINATY TABLE)
Save wrk	Сохранение массивов Work в выбранном формате файлов.
Wrksh to PIRAT	Сохранение загруженных данных в формате программы 'PIRAT'
Print...	Печать содержимого окна отображения.
Export...	Сохранение содержимого окна отображения в WMF или PS форматах.
Set InitDir	Диалог настройки переменных программы.
Run file.exe	Запуск выполнения внешней программы.

Scan

Data->Wrksh	Копирование содержимого массива Data в массив Work.
Wrksh->Data	Копирование содержимого массива Work в массив Data.
Modification	выпадающее подменю
Data-Wrksh	Замена содержимого массива Work на разность Data-Work.
Wrksh*N	Умножение выделенного участка массива Work на число N.
Wrksh+N	Сложение выделенного участка массива Work с числом N.
Line	Аппроксимация выделенного участка массива Work прямой
Eq. Null	Замена элементов массива не равных нулю на нуль в зависимости от значения флага
ABS(wrksh)	Вычисление модуля от элементов выделенного участка массива Work.

Derive	Вычисление производной от выделенного участка массива Data.
Polarization	Вычисление локальной степени поляризации ($P = V/I * 100\%$).
I, V<=>R, L	Преобразование поляризаций.
Ta[K]=>Flux	Умножение массива Work на коэффициент перевода Ta к потокам.
Min rel.Csun	Вычисление минимума между элементами симметричными относительно центрального значения массива Work.
Copy rel.Csun	Копирование выделенного участка массива Work относительно центрального значения массива.
Line tail	Вычитание постоянной составляющей массива Work.
Correction	выпадающее подменю
Ephemeride	Изменение эфемеридных значений загруженных данных.
Change of amplif	Автоматическая коррекция переключения усиления.
RL Cross-Talk	Коррекция паразитного cross-talk сигнала.
Tail of curve	Замена n (первых или последних) элементов массива Work значением n-ого (или N-n) элемента массива Work.
Overturn	Переворот выделенного участка массива Work относительно линии, соединяющей его крайние элементы.
Move L from R	Сдвиг массива с одной поляризацией относительно массива с другой поляризацией.
Auto move L_R	Автоматическая функция коррекции кросс-поляризационного сигнала
Wide Gauss	Аппроксимация широкой составляющей диаграммы гауссианой.
Center Vscan	Вычисление центра Солнца(Луны) по производным на краях скана.
Calibr Quite Tb	Калибровка скана по табличным значениям Ta.
Calibr Flux	Калибровка скана по интегральному потоку.
Calibr Bl.body	Калибровка скана по калибровочной ступеньке.
Smooth	Выпадающее подменю.
Gauss	Свертка выделенного участка массива Work с гауссианой.
Median	Применение median фильтра к выделенному участку массива Work.
Cube Spline	Аппроксимация выделенного участка массива кубическим сплайном.
Comm.List	Создание списка часто повторяющихся операций.
Delete	Удаление активного скана.
Transform	

Move Scan	Сдвиг активного скана относительно остальных(только в группе сканов).
Equal Length	Приведение всех сканов к одинаковой длине массивов.
Equal Step	Приведение всех сканов к одинаковому шагу между элементами массивов (минимальному) и одинаковой длине массивов.
Scan sub scan	Вычитание одного скана (даты) из остальных сканов (дат).
Center Sun	Нахождение центральных значений сканов и приведение сканов к одной длине.
Group scan min	Вычисление нижней огибающей группы сканов.
Group scan aver	Вычисление среднего скана из группы сканов.
Calc	
Full Flux	Вычисление полного потока выделенного участка массива.
Gauss Flux Correlation	Гаусс- анализ выделенного участка массива Work. Вычисление коэффициента корреляции между выделенными участками разных сканов.
Sigma	Вычисление AMD дисперсии выделенного участка массива.
Surf3D	Вычисление матрицы для представления группы сканов (Surf, Contour).
View	
Digit Frame	Включение оцифровки шкал.
Choice Scale	Диалог выбора участка массива для показа(работы).
Equal Scale	Включение одинаковой шкалы для разных поляризаций.
Choice Path	Окно демонстрации выбранного участка относительно всего массива.
Scans Group	Диалог выбора группы сканов.
View Group	Диалог представления группы сканов.
Full scan	Показ всего скана(ов).
Set View	Основные настройки окна отображения.
Scan header	Показ заголовка активного скана.
Gauss Param	Вывод в окно редактора параметров гауссиан (после гаусс- анализа).
Del Gauss	Удаление служебных массивов гаусс- анализа.
Spec.Func	выпадающее меню (инициализируется подключаемой DLL).
Help	
Main help	Вызов HELP-файла по работе с программой Work Scan .
About...	

Cancel

Отмена выполнения функций с блокировками сообщений.

ГЛАВА 2. Шумовые бури и структура микроволнового излучения активных образований на Солнце.

Введение.

Разработанное и описанное в главе 1, программное обеспечение на основе программы Work Scan было применено к исследованию радиоизмерений ряда солнечных образований на многоволновом комплексе ПАС радиотелескопа ПАТАН-600 [9].

При этом для получения более полной информации об исследуемом объекте широко использовались комплексные наблюдения с привлечением других крупных инструментов, таких как VLA (США) и радиогелиограф в Nobeyama (Япония), а также данные в EUV и рентгеновском диапазонах со спутников YOHKOH и SOHO и ряда наземных обсерваторий (ГАС ГАО РАН, ССРТ ИСЗФ СО РАН, Kit Peak, BBSO, Mt.Wilson и др.).

Совместные наблюдения Солнца на ПАТАН-600 и VLA, проводившиеся на протяжении полутора десятилетий [16], [22], открыли новые перспективы для диагностики физических параметров протяженных корональных структур, окружающих солнечные активные области. Высокое двумерное разрешение VLA, объединенное с широким спектральным диапазоном и точными данными поляризации, полученными на одномерных сканах радиотелескопа ПАТАН-600, обеспечило получение информации относительно структуры и напряженности магнитных полей в короне, а также значения температуры и электронной плотности в различных плазменных образованиях [16],[23]. Основные физические процессы в солнечных структурах управляются

магнитными полями и локальными электрическими токами в короне. Впоследствии, эти структуры были названы магнитосферами солнечных активных областей [16].

Магнитный поток, возникая в пределах магнитосфер активных областей, может взаимодействовать с уже существующими магнитными полями, вызывающими ускорение частиц. Эти частицы нагревают окружающую плазму до умеренно высоких температур, или вызывают импульсные выбросы или другие более длительные (часы - дни) формы нетеплового высвобождения энергии. Одним из примеров длительной формы высвобождения энергии являются шумовые бури первого типа как наиболее общий тип проявления солнечной активности на метровых волнах. Источником шумовых бурь первого типа является плазменная турбулентность как результат введения энергичных электронов в корональные петли после пере замыкания магнитных силовых линий [24], [25].

Ранее в работе [26] было проведено сопоставление активных областей, излучающих в микроволновом диапазоне (S- компонента), по наблюдениям на РАТАН-600 и активности в метровом диапазоне. Эти результаты, полученные без использования высокого пространственного разрешения, показали, что шумовые бури всегда связаны с микроволновым излучением мощных активных областей.

В результате совместных серий наблюдений на VLA и РАТАН-600 получен статистический материал, который показал, что длительное нетепловое излучение шумовых бурь располагалось и над слабыми активными областями. При этом, как тепловое микроволновое излучение, тепловое рентгеновское излучение, так и площадь соответствующих групп пятен на фотосфере и

напряженность корональных магнитных полей были меньше, чем те же характеристики для других, более мощных активных областей.

Однако, именно эти, относительно слабые активные области, связанные с шумовыми бурями, показали довольно сильное излучение источника типа дециметрового гало [27]. Такое длительное излучение шумовых бурь интерпретируется как излучение ускоренных нетепловых частиц, захваченных в радиационных поясах над активными областями, которые также создают излучение дециметрового гало.

С целью установления связей между микроволновым (сантиметровым и дециметровым) излучением S- компоненты, имеющей преимущественно тепловой характер, и шумовыми бурями в метровом диапазоне длин волн с нетепловым характером излучения, было проведено несколько серий совместных наблюдений на РАТАН-600 и VLA в период с 1992 по 1995 года.

Описание серии совместных наблюдений на РАТАН-600 и VLA.

Рассмотрено несколько серий совместных наблюдений, выполненных в августе 1992 г., мае и августе 1993 г. Для исследования отбирались относительно стабильные или медленно меняющиеся активные области на масштабах суток или нескольких суток. На РАТАН-600 в результате наблюдений получали информацию о спектре интенсивности и поляризации в микроволновом диапазоне радиоизлучения активных областей, а наблюдения на VLA обеспечивали информацией в метровом

диапазоне волн, связанной с локализацией шумовых бурь и их интенсивностью.

В некоторых случаях, данные были дополнены наблюдениями шумовых бурь на радиогелиографе Nancaу (Франция) согласно бюллетеню «Solar Geophysical Data» [28].

Описание наблюдений на РАТАН-600.

В рамках программы комплексных наблюдений в течение 1992 и 1993 гг., РАТАН-600 использовался в режиме его работы в антенной системе, состоящей из Южного сектора главного отражателя и перископического зеркала. В фокусе такой двухзеркальной системы располагалось третье фокусирующее зеркало в виде несимметричного параболического цилиндра. Панорамный Анализатор Спектра использовался в этот период на 24 волнах в диапазоне 1.7-8 см. Диаграмма направленности антенной системы (Юг + Перископ) определяется размерами апертуры плоского отражателя и составляла на волне 1.7 см 15' в горизонтальном и 10' в вертикальном сечении. На других длинах волн размеры диаграммы изменяются пропорционально длине волны.

Наблюдения проводились ежедневно во время местного полудня (около 9^h UT) с регистрацией интенсивности $I=I_R+I_L$ и круговой поляризации радиоизлучения $V=I_R-I_L$.

Для калибровки данных и перевода антенных температур в поток радиоизлучения использовались наблюдения Крабовидной туманности и Луны.

Для привязки к текущим изменениям активности Солнца использовались данные полного потока мировой сети службы Солнца (обсерватория Toyokawa).

По результатам наблюдений на РАТАН-600 были выявлены характерные структуры активных областей, связанных с шумовыми бурями, которые можно сгруппировать следующим образом:

- 1) Компактные ($\leq 20''$) источники над пятнами с высокими значениями напряженности фотосферного магнитного поля ($H \geq 1000G$). Большинство этих источников имеют излучение с круговой поляризацией со знаком, соответствующим полярности магнитного поля на уровне фотосферы (право-поляризованные для северной полярности фотосферного поля и лево-поляризованные для южной полярности на фотосфере).
- 2) Протяженные (около нескольких угловых минут) источники типа "гало", которые не имеют никаких существенных структурных деталей в интенсивности без заметной круговой поляризации.
- 3) Компактные ($\leq 20''$) неполяризованные источники, расположенные над нейтральной линией фотосферного магнитного поля.

Из обработки одномерных сканов с использованием гаусс-анализа были определены общий поток, размер и степень круговой поляризации компактных источников на каждой длине волны. Так же было выделено и протяженное гало в каждом отдельном случае.

Особый интерес представил период 6 - 9 мая 1993, когда на солнечном диске были видны одновременно три сложные активные области (AR 7496, AR 7499 и AR 7500).

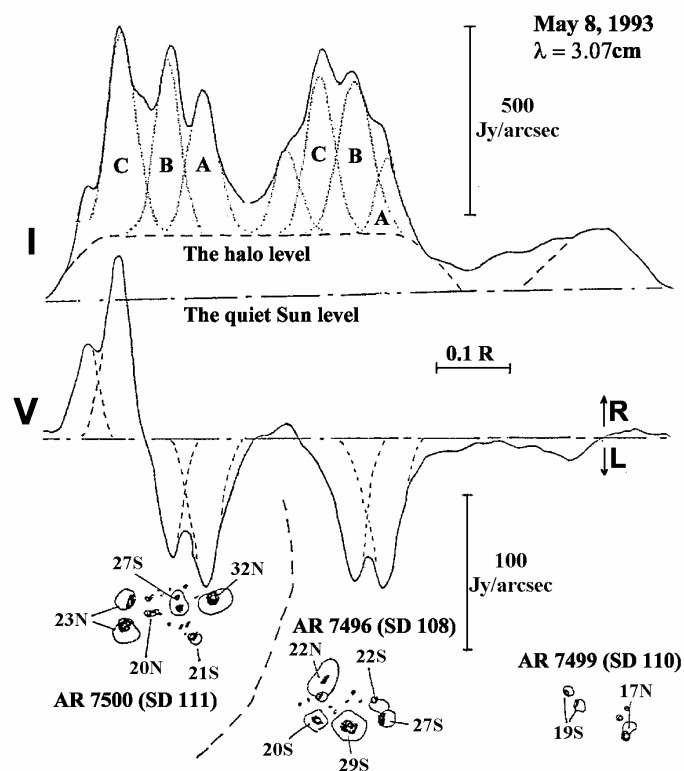


Рис. 12 Скан РТАН за 8 мая 1993 в сравнении с изображениями солнечных пятен полученных на Кисловодской станции (ГАС ГАО)(внизу).

На Рис. 12 показан радиоскан на волне $\lambda = 3.07$ см за 8 мая 1993 в общей интенсивности и круговой поляризации, сопоставленный с оптической картой Солнца из бюллетеня "Солнечные Данные"[29].

Оптические данные ГАС ГАО (г. Кисловодск) [29] показали, что активные области AR7496 и AR 7500, расположенные на северо-востоке, имели большое количество пятен, их общая площадь, медленно менялась за данный период. В то же время, в небольшой группе пятен AR 7499 общая площадь быстро увеличивалась, начиная с 6 мая (Рис. 13).

Сопоставление с картами спутника YONKON в мягком рентгене показывает наличие интенсивных и развитых корональных петель над AR 7496 и AR 7500. Это согласуется с более высоким потоком радиоизлучения этих активных областей и их большей

Kislovodsk Sunspot Data

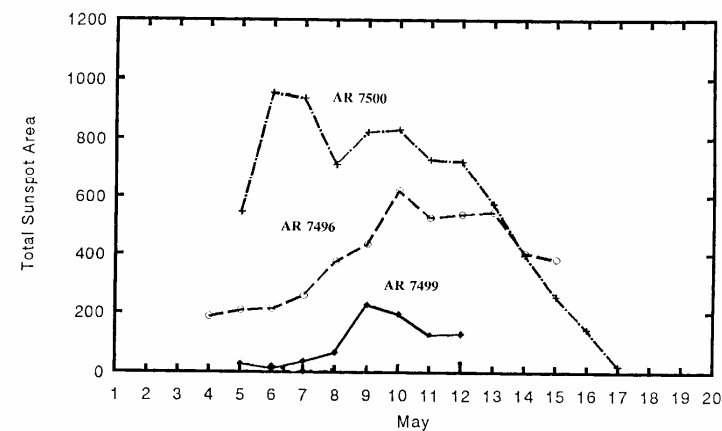


Рис. 13 График изменения площадей активных областей на Солнце в мае 1993 года.

площадью пятен. Общая площадь активной области AR 7499 была на порядок меньше, чем площади этих двух других областей, хотя

площадь группы и излучение в мягком рентгене значительно увеличились в период между 6 - 9 мая (Рис. 17). Наблюдения на РАТАН-600 также показали, что поток радиоизлучения от гало, связанного с AR 7499, увеличился примерно в 2 раза в течение этого периода (Рис. 14), показывая физическую взаимосвязь между электронами, которые генерируют излучение микроволнового гало и тепловой плазмой, излучающей в мягком рентгене.

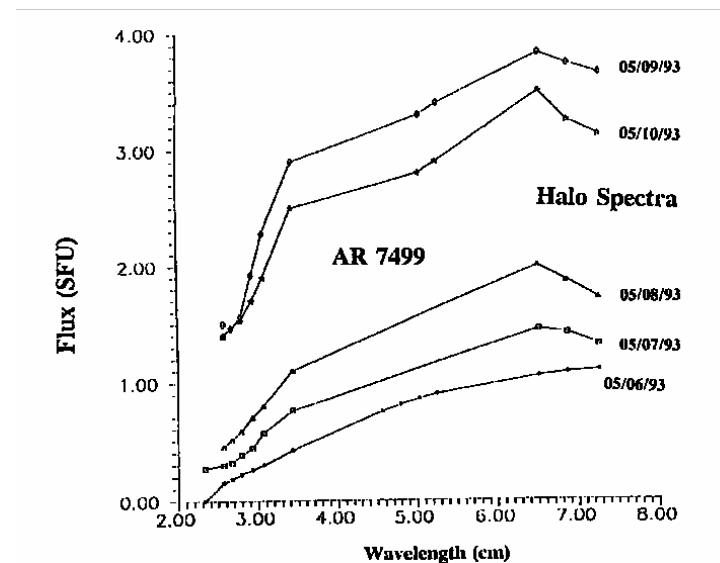


Рис. 14 Спектры полных потоков гало AR7499, полученные на РАТАН-600 в период 6-10 мая 1993 года.

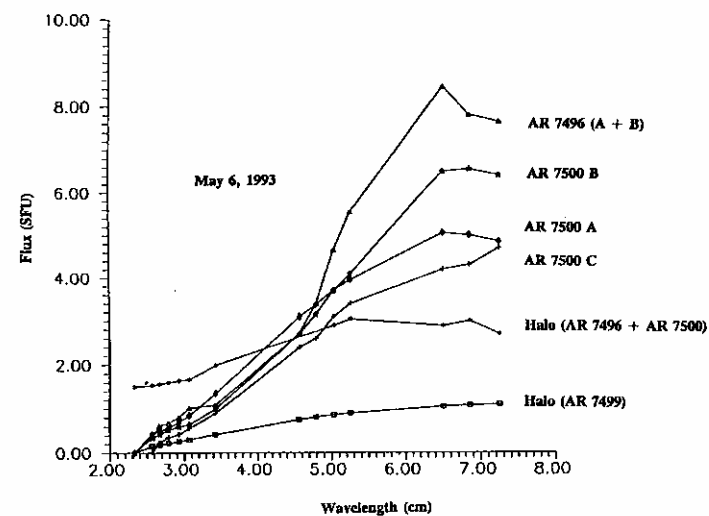


Рис. 15 Спектры потоков радиисточников над пятнами и гало для активных областей AR7496, AR7499, AR7500 за 6 мая 1993

Все радиоисточники имеют рост спектра с длиной волны. На Рис. 15 показаны примеры спектров, полученных на РАТАН-600 для обеих групп пятен и источников, ассоциируемых с гало. После процедуры, описанной в работах [16],[30], можно оценить напряженность магнитного поля в короне над источниками, связанными с солнечными пятнами в предположении, что радиоизлучение является тепловым циклотронным (или гирорезонансным).

Это подразумевает, что наблюдения на волне λ , соотносятся с напряженностью магнитного поля, как $H=3570/\lambda$ [Гс], где λ - длина волны в см. Такое предположение основано на наблюдениях, которые показывают, что связанные с пятнами источники микроволнового излучения имеют круговую поляризацию с избытком необыкновенного излучения. Обычно учитывается излучение на третьей гармонике гирочастоты, потому что гирорезонансное излучение на второй гармонике является оптически толстым в обыкновенной и необыкновенной модах и, следовательно, неполяризовано, в то время как излучение на четвертой гармонике является более оптически тонким и поэтому не наблюдается.

Таким образом, установлено, что измерения излучения плазмы над пятнами с температурой 10^6K обычно относятся к третьей гармонике гирочастоты, и это было подтверждено детальными моделями для большого числа активных областей (например [16],[31]). Как показано в работе [32], излучение на самой короткой волне, $\lambda_{\text{кр}}$, генерируемой на третьей гармонике гирочастоты, определяет самую сильную напряженность магнитного поля в корональной области над пятном.

Результаты измерений магнитного поля H_{rad} в радиодиапазоне этим методом для всех активных областей указанных периодов (сопровождающиеся и не сопровождающиеся шумовыми бурями) даются в таблице 1, вместе с максимальной напряженностью магнитного поля на фотосфере в пятне H_{opt} , и их отношение $H_{\text{rad}}/H_{\text{opt}}$.

Таблица 1. Характеристики активных областей по совместным наблюдениям на РАТАН-600 и VLA.

дата	номер	пятенный	площадь	H_{opt}	шумовая	H_{rad}	$H_{\text{rad}}/H_{\text{opt}}$
	АО	источник	($10^{-6}A_{\odot}$)	[Гс]	буря	[Гс]	
1 мая 1992	AR 7150	A(запад)	158	2000N	+	880	0.44
		B(восток)	≤ 100	2000S		960	0.48
	AR 7143	A(запад)	68	2100		1370	0.65
	AR 7151		70	2000N		1210	0.61
	AR 7152		114	2200S		1550	0.7
3 мая 1992	AR 7150	A(запад)	146	1500N		1150	0.76
	AR 7150	B(восток)	≤ 100	2400S		1210	0.5
	AR 7143		36	1900S	+	1210	0.64
	AR 7151		60	2100N		930	0.44
	AR 7152		49	2200S		1190	0.54
	AR 7154		247	1800N		1550	0.86
9 мая 1992	AR 7162	A(запад)	33	2300S	+	1100	0.48
	(152SD)	B(восток)	≤ 330	2100N		1000	0.47
	AR 7154	A(запад)	200	2400N		1390	0.58
	(145SD)	B(восток)	≤ 200	2200S		1550	0.7
	AR 7160		≤ 124	2400N		1430	0.6
	AR 7163		≤ 40	2200N		1490	0.68
10 мая 1992	AR 7162	B(восток)	≤ 33	2400N	+	860	0.36
		A(запад)	200	2800S		1450	0.52
	AR 7154	B(восток)	≤ 200	2800S		1790	0.64
		A(запад)	33	2800S		1390	0.49
	AR 7160		≤ 124	2600N		1330	0.51
	AR 7163		≤ 40	2200N		1490	0.61

дата	номер АО	пятенный источник	площадь ($10^{-6}A_0$)	H_{opt} [Гс]	шумовая буря	H_{rad} [Гс]	H_{rad}/H_{opt}
6 мая 1993	AR 7496	A(запад)	176	2300S		1630	0.7
	(108SD)	B(восток)	поры	2100S			
	AR 7500	A(запад)	267	2700S	+	1390	0.51
	(111SD)	B(середина)	≤ 200	2400S	+	1340	0.56
	AR 7499	A(запад)	5	2000N		1530	0.76
	(110SD)	B(восток)	≤ 5	1900S			
19авг. 1993	AR 7565		134	2600N	+	1800	0.72
	AR 7163		317	2100N		1620	0.77
	AR 7563		16	1800S		810	0.45
22авг. 1992	AR 7563		140	2300N		1430	0.62
	AR 7566		228	2600N	+	1620	0.62
7мая 1993	AR 7499	C(восток)	≈ 200	2500N	+	1160	0.46
	(110SD)	A(запад)	23	2200N		550	0.24
		B(восток)	≤ 10	1900S			
	AR 7496	A(запад)	134	2400S		2050	0.85
	(108SD)	B(восток)	≤ 100	1900S		1320	0.7
	AR 7500	A(запад)	258	2400S		1740	0.72
	(111SD)	B(середина)	≤ 258	2300S		1660	0.72
		C(восток)	≈ 300	2200N		1620	0.74
8мая 1993	AR 7499	W(главное)	24	1900N	+	550	0.28
		E(хвост.)	12	1700S	+		
	AR 7496	W(главное)	176	2700S		1760	0.62
	(108SD)	M(серед.)	≥ 120	2900S		1900	0.65
		E(хвост.)	≤ 120	2200N			
	AR 7500	W(главное)	203	3200S		1700	0.53
	(111SD)	M(серед.)	≤ 200	2700S		1550	0.57
		E(хвост.)	≥ 200	2300N		1900	0.82
9 мая 1993	AR 7499	W(главное)	105	2200N	+	1190	0.54
	(110SD)	E(хвост.)	поры	2040S	+	715	0.35
	AR 7496	W(главное)	152	2700S		1800	0.67

дата	номер АО	пятенный источник	площадь ($10^{-6}A_0$)	H_{opt} [Гс]	шумовая буря	H_{rad} [Гс]	H_{rad}/H_{opt}
(108SD)		M(серед.)	≤ 152	2600S		2100	0.8
		E(хвост.)	15	2500S			
AR 7500		W(главное)	244	2900S		2550	0.88
(111SD)		M(серед.)	≤ 200	2100S		2000	0.95

Эти результаты представлены графически на Рис. 16. Они показывают, что для областей с шумовыми бурями $H_{rad}/H_{opt} \sim 0.47$, в то время как для других областей $H_{rad}/H_{opt} \sim 0.68$, в соответствии с предыдущими результатами [30]. Это означает, что напряженность магнитного поля в короне, определенная для пятенных радиоисточников в активных областях с шумовыми бурями, является относительно более слабым по сравнению с корональными магнитными полями над пятнами в активных областях, которые не связаны с шумовыми бурями.

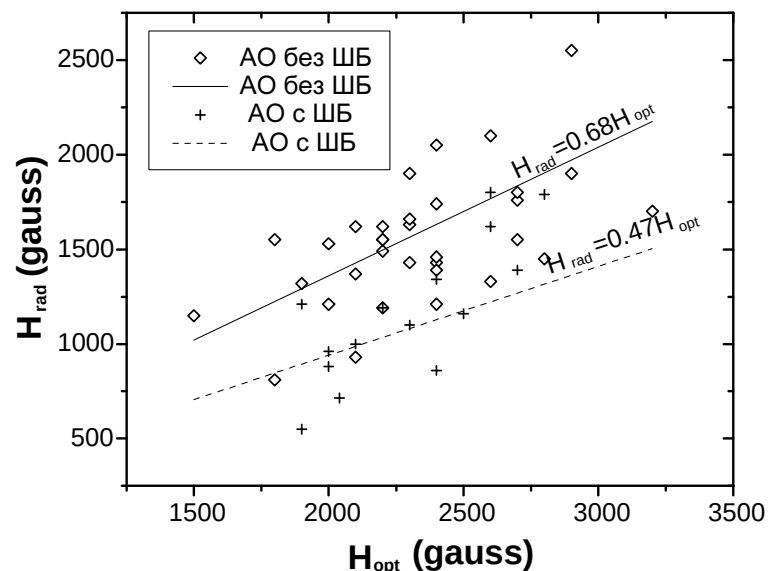


Рис. 16 График, демонстрирующий отношение напряженностей корональных и фотосферных магнитных полей радиоисточников с шумовыми бурями и без.

VLA наблюдения

Наблюдения Солнца на VLA в период мая 1992 года и мая 1993 года проводились на волне на 91 см (327.4MHz). Полный солнечный диск наблюдался с временным разрешением 3.3 секунды и полосой 3.25MHz в течение последовательных 45-минутных периодов, сопровождаемых пятиминутным наблюдением соседнего источника калибровки.

Во все дни наблюдения на синтезированных картах на 91 см обычно доминировал отдельный источник шумовой бури с яркостной температурой $T_B = 10^7 - 5 \times 10^8$ К и степенью круговой поляризации $\rho_c = 50-100\%$.

Карты коррелированного потока показали медленно изменяющиеся (от 10 минут до часа) уровни потоков и частые, импульсные ($\Delta \leq 3.3$ секунды) выбросы (bursts), которые имели близкую к 100% поляризацию. Предполагается, что источники на 91 см были шумовыми бурями первого типа [33], [34].

На Рис. 17 сравниваются VLA карты с изображениями, полученными со спутника Yohkoh в мягком рентгене. Шумовые бури на 91 см расположены около активных областей, хотя центр источника не всегда находился непосредственно выше петель в мягком рентгене, соединяющих крупные пятна.

8 и 9 мая 1993 года шумовая буря была связана с активной областью AR 7499, магнитная структура которой начала усложняться, и ее излучение в рентгене увеличивалось, начиная с 6 мая. Над активными областями AR 7496 и AR 7500 шумовые бури не были обнаружены 6 мая до уровней $T_B = 2 \times 10^6$ К.

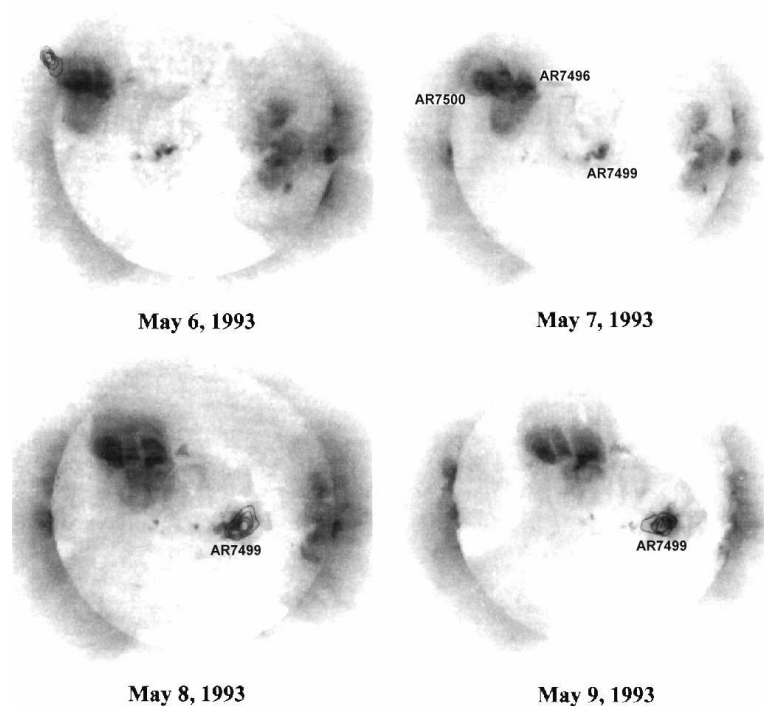


Рис. 17 VLA карты полной интенсивности на волне 91.6 см в сравнении с изображениями в мягком рентгене, полученными со спутника YОНKОН (в период 6-9 мая 1993 года). Шумовая буря располагается над слабой активной областью AR7499.

Обсуждение результатов

Несмотря на сорок лет исследований природы шумовых бурь, источник энергии для механизма их радиоизлучения все еще не найден. Общая точка зрения сводится к тому, что излучение генерируется нетепловыми электронами, ускоренными до энергий в диапазоне от нескольких keV до десятков keV, и что они

расположены в пределах крупномасштабных петель, расположенные над активными областями или соединяющие отдаленные активные области на Солнце [33],[34],[35]. Фактически, начало шумовых бурь следует за формированием протяженных, плотных петель в средней короне, в предположении, что шумовые бури связаны с крупномасштабной перестройкой корональных магнитных полей [36].

Предполагается, что крупномасштабный корональный источник шумовых бурь может совпадать с дециметровым гало активной области, которое является длительно существующим источником нетепловых электронов. Относительная мощность этого гало может действительно определять, происходит или нет излучение шумовой бури на метровых волнах.

В такой интерпретации крупномасштабные корональные петли накапливают в ловушке ускоренные частицы и вынуждают их находиться в пределах относительно больших объемов в активных областях на Солнце, аналогично частицам, пойманным земными радиационными поясами.

Подобный резервуар нетепловых электронов наблюдается на Солнце как в пределах дециметрового гало, так и в пекулярных радиоисточниках, расположенных над нейтральной линией магнитного поля в активных областях [16],[37].

Спектр гало растет с длиной волны, что трудно интерпретировать в рамках теплового механизма (см. Рис. 18). Тепловое гирорезонансное излучение, вероятно, также не ответственно за излучение гало, потому что для такой интерпретации необходимы сравнительно сильные магнитные поля

по всей области, около 400 Гс (что соответствует излучению на третьей гармонике гирочастоты на волне 9 см).

Приведенные наблюдения показывают, что шумовые бури связаны с относительно быстро развивающимся гало. Замечено, что в активных областях без гало или с относительно слабым гало, шумовые бури не наблюдаются. С другой стороны, шумовые бури могут возникать над слабыми активными областями (как в случае с AR7499) с хорошо развитым дециметровым гало и слабым или полностью отсутствующим циклотронным излучением над пятнами. Однако, мощные активные области с сильными магнитными полями на фотосфере и сильным излучением в микроволновом диапазоне и рентгене часто совсем не сопровождаются шумовыми бурями. Радиоизлучение на микроволнах для таких активных областей проявляется в виде ярких циклотронных радиоисточников над пятнами в сантиметровом диапазоне и относительно слабым излучением гало в дециметровом диапазоне.

Отмеченные выше взаимосвязи подтверждены нашими статистическими данными на Рис. 16, который указывает на то, что в широком диапазоне фотосферных магнитных полей (от 1500 Гс до 3500 Гс) радиоизмерения корональных магнитных полей для циклотронных радиоисточников над пятнами дают систематически меньшие значения (на 30%) для активных областей, сопровождающихся шумовыми бурями.

На этом основании предложена следующая модель активной области [16] (см. Рис. 18), согласно которой нетепловые частицы попадают в магнитную ловушку в пределах крупномасштабных магнитных петель, превосходящих по размерам активную область. Эти нетепловые частицы ответственны за протяженный компонент

гало, обнаруженный ранее в дециметровом диапазоне длин волн (приблизительно от 4 до 12 см) [38], [39]. На Рис. 18 видно, что радиоизлучение гало бесструктурно и слабо поляризовано, но его интенсивность растет с длиной волны, тогда как контраст пятенных источников резко падает.

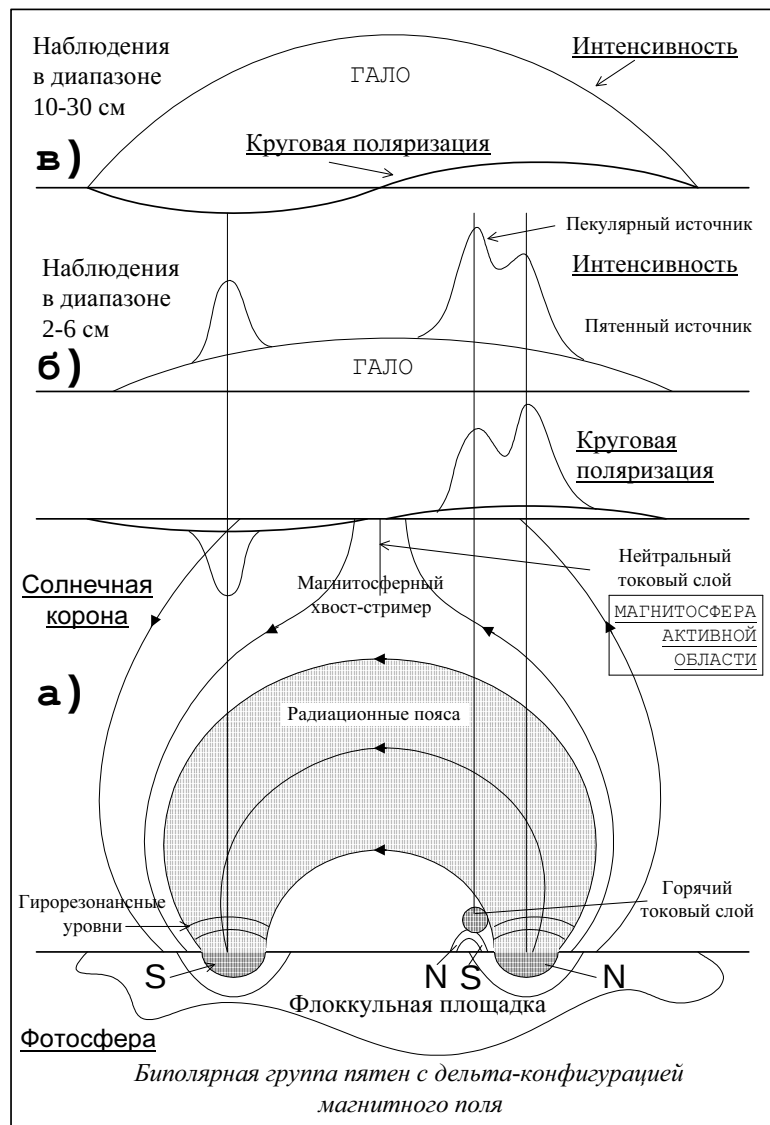


Рис. 18 Магнитосфера активной области (MAO): а) схематическое представление, б) регистрация радиоизлучения MAO в сантиметровом диапазоне в интенсивности и круговой

поляризации, в) регистрация радиоизлучения MAO в дециметровом диапазоне.

Нетепловая энергия, накопленная и запасенная в пределах этого резервуара, может быть израсходована на генерацию длительных шумовых бурь на метровых волнах. Интенсивное микроволновое излучение, связанное с пятнами (тепловое гирорезонансное излучение) или с нетепловыми пекулярными источниками является локальным проявлением энергии, запасенной в этом большом объеме.

Шумовые бури могут быть также вызваны перестройкой крупномасштабной магнитной структуры [34], [40]. Например, шумовая буря в активной области AR7499, как отметил K.-L. Klein в [98], фактически была связана с развитием фотосферной магнитной структуры и медленного увеличения излучения в мягком рентгене в этот период. В данной интерпретации фактическим источником нетепловых частиц для шумовой бури являлся резервуар гало.

Будущие исследования нетепловых шумовых бурь могут дать понимание других форм ускорения частиц, подобных тем, которые встречаются во время вспышек. Различия заключаются в масштабах: для шумовых бурь соответствуют больший размер и большая длительность (часы-дни), для вспышек - меньшие размеры и длительность (минуты).

Можно дать некоторые комментарии относительно неизвестного источника ускорения частиц, который необходим для солнечных шумовых бурь, также как и для длительного нетеплового радиоизлучения гало от солнечных активных областей. Эти явления требуют непрерывного ускорения нетепловых электронов в течение часов. Одна возможность - постоянные вспышки с низкой амплитудой. Другая возможность - ускорение частиц в пределах

крупномасштабного магнитного резервуара, возможно в "двойных электростатических слоях" или некоторого другого процесса, который является аналогичным для производства долгоживущих нетепловых частиц в пределах земной магнитосферы.

Исследования магнитных полей в короне активных областей Солнца, диагностика основных параметров плазмы и особенно выявление постоянно присутствующих нетепловых компонент в их радиоизлучении позволили, таким образом, продолжить развитие концепции магнитосферы активной области Солнца [41]. Естественно, это понятие базируется на опыте исследования магнитосферы Земли и других планет, а также, уже сложившейся в астрофизике, практике применения этого термина к другим объектам, таким как плазменные структуры в атмосферах звезд и пульсаров.

Выводы

В результате совместных наблюдений активных областей на Солнце, связанных с присутствием шумовых бурь, было установлено следующее:

1. Шумовые бури часто присутствуют в слабых активных областях.
2. Магнитные поля, измеренные радиометодом, имеют значения напряженности в активных областях с шумовыми бурями на 20% меньше, чем в активных областях без шумовых бурь.
3. Установленные выше факты легли в основу создания новой концепции магнитосферы активной области (по аналогии с магнитосферами планет), в которой шумовые бури являются результатом излучения радиационных поясов, образованных

магнитными полями активной области. В слабых магнитных полях энергия частиц (электронов) значительно выше магнитной энергии, благодаря чему они вырываются в корону из радиационных поясов, где и создаются условия для генерации шумовых бурь.

ГЛАВА 3. Особенности поляризации радиоизлучения локальных источников в активных областях в присутствии шумовых бурь.

Введение

В данной главе представлены результаты исследований поляризационных свойств радиоизлучения активных областей, сопровождающихся шумовыми бурями.

Для этого использовались совместные наблюдения на РАТАН-600, VLA и других инструментах. На РАТАН-600 наблюдения выполнялись на ПАС (в диапазоне 1.7 - 21 см на 27 волнах) в интенсивности и круговой поляризации. На VLA наблюдения проводились, в основном, на волне 91.6 см для локализации шумовых бурь, но в некоторых случаях дополнялись данными на волнах 20.7 и 6 см.

Для локализации положения шумовых бурь в те дни, когда не было наблюдений на VLA, использовались опубликованные в «Solar Geophysical Data» наблюдения на радиогелиографе в Nançay на 169 MHz.

Для исследования структуры и развития корональных магнитных арок, связанных с шумовыми бурями и пятенными источниками, радионаблюдения сопоставлялись с изображениями в мягком рентгене, полученными со спутника YONKOH SXT.

Из предыдущей главы видно, что шумовые бури не всегда связаны с самой сильной активной областью с высокой вспышечной активностью. Следует ожидать также наличия связи между шумовыми бурями и сложными магнитными структурами

нижележащих корональных полей, которая могла быть найдена из спектральных наблюдений в микроволновом диапазоне.

Хорошо известно явление инверсии знака круговой поляризации в локальных источниках после прохождения активных областей центрального меридиана Солнца. Этот эффект обусловлен прохождением радиоизлучения через область квазипоперечных магнитных полей, где продольная компонента магнитного поля меняет знак (см. [42],[43]).

Одна из специфических особенностей этого эффекта состоит в том, что инверсия начинается на более длинных волнах, а потом переходит на более короткие. После инверсии знак поляризации не меняется в течение всего времени прохождения области по диску Солнца.

Однако, полученные нами результаты показывают, что активные области, связанные с излучением шумовых бурь, имеют различное поведение круговой поляризации радиоизлучения локальных источников в микроволновом диапазоне. Одним из таких проявлений является многократное изменение знака круговой поляризации с частотой. Другое связано с резким увеличением потока излучения (интенсивность и поляризация) в узкой полосе частот микроволнового диапазона.

Обнаружены следующие особенности инверсии знака круговой поляризации:

1. Момент инверсии знака круговой поляризации в микроволновом диапазоне не зависит от положения АО на диске по отношению к центральному меридиану.

2. Часто инверсия круговой поляризации длится один или несколько дней и потом излучение возвращается к первоначальному знаку.
3. Инверсия или значительное уменьшение степени поляризации перекрывает небольшой диапазон частот (порядка 10%) и может происходить на одной или двух волнах при 5% частотном разрешении использовавшегося панорамного анализатора спектра (ПАС ПАТАН-600).
4. Во всех случаях инверсии знака поляризации с указанными особенностями при сопоставлении с наблюдениями в метровом диапазоне (по данным VLA или Nancaу) над этими активными областями были локализованы шумовые бури.
5. Узкая полоса частот, в которой происходят наблюдаемые эффекты, указывает на пространственную локализацию места физического явления.

Результаты наблюдений

Сводка наблюдений, которые были выполнены по комплексным международным программам с целью сопоставления спектральных характеристик локальных источников над пятнами в микроволновом диапазоне и шумовыми бурями в метровом диапазоне, представлена в табл. 2, 3 и 4. Здесь же включен перечень наблюдений на других сопутствующих инструментах: рентгеновские наблюдения на спутнике YONKON, радиокарты по данным радиогелиографа в Nancaу, данные оптических наблюдений (магнитные поля) в обсерваториях Kit Peak и ГАС ГАО (Кисловодск).

Существует три типа спектрально-поляризационных характеристик локальных источников, непосредственно связанных с тенью пятна (пятенные источники). Это: а) пятенные источники с растущими спектрами с циклотронным механизмом излучения без инверсии знака поляризации во всем диапазоне; б) пятенные источники со сменой знака поляризации, интерпретируемые как прохождение радиоизлучения через область квазипоперечных магнитных полей; в) пятенные источники с неоднократной сменой знака поляризации.

Таблица 2. Сводка наблюдений на различных инструментах.

Инструмент	Конфигурация	Периоды наблюдений	Диапазон
VLA	D	Октябрь 28, 30, 31, 1994. Ноябрь 3, 1994. Март 21, 24, 27, 1995	91.6 см, 20.7 см,
ПАТАН-600	Южный сектор + перископ	С 28 октября по 4 ноября 1994. Июль 15, 16, 17 1995. Март 21, 24, 27 1995.	27 волн в диапазоне от 1.7 см до 21 см
YONKON	спутник	Все периоды	SXR
Nancaу	режим картографирования	Октябрь 28,29,30 Ноябрь 1,2 1994 Июль 15, 16, 17 1995	169 MHz
KIT PEAK	Регулярные наблюдения		Карты магнитных полей
Кисловодск	Регулярные наблюдения	все периоды в 1994 году	белый свет и магнитные поля

Таблица 3. Наблюдения шумовых бурь на VLA на 91 см.

Дата	Время (UT)	Активная область	Максимум T_B , [K]	Поляризация
------	------------	------------------	----------------------	-------------

Дата	Время (UT)	Активная область	Максимум T_B , [K]	Поляризация
28 октября 1994	15 30-19 00	AR7794	$2,7 \times 10^7$	85 % LCP
30 октября 1994	15 30-19 00	AR7794	$2,9 \times 10^7$	90 % LCP
31 октября 1994	15 00-19 00	AR7794	$6,9 \times 10^6$ $4,8 \times 10^6$	85% LCP 90 % RCP
3 ноября 1994	15 00-19 00	AR7794 AR7798	$1,2 \times 10^6$ $7,7 \times 10^6$	80% LCP 70% RCP
19 марта 1995	17 00-19 30	AR7857 AR7857	$1,5 \times 10^6$	??
21 марта 1995	15 40-19 10	AR7857	$1,5 \times 10^6$	??
27 марта 1995	15 00-18 40	AR7857 AR7858	$1,7 \times 10^6$ $2,4 \times 10^7$	?? 95% LCP

Таблица 4. Наблюдения шумовых бурь обсерватории Napсау использованных в работе.

Дата	Гелиографические координаты		IMP	Время наблюдения(UT)	
	Средние значения			Начало	Конец
	E-W	S-N			
28/10/94	-0,92	+0,15	2	07 50E	15 47D
29/10/94	-0,71	+0,29	2	07 50E	15 50D
29/10/94	-0,45	+0,38	2	07 50E	15 50D
30/10/94	-0,23	+0,12	2	07 50E	15 49D
30/10/94	-0,07	+0,24	1	07 50E	15 50D
1/11/94	+0,04	-0,38	1	07 40E	15 28D
2/11/94	+0,32	-0,2	1	07 51E	15 30D
19/03/95	-0,23	-0,17	1	08 30E	15 30D
27/03/95	-0,56	+0,11	4	08 30E	15 30D
2/11/94	+0,32	-0,2	1	07 51E	15 33D
15/07/95	-0,19	-0,03	1	08 06E	15 36D
16/07/95	+0,08	+0,05	1	08 06E	15 36D
17/07/95	+0,23	+0,17	1	08 00E	15 36D

Ниже демонстрируются результаты наблюдений, в которых имеют место все типы проявления спектрально - поляризационных характеристик пятенных источников.

Период 28 октября - 4 ноября 1994 года.

В начале этого периода на диске присутствовала одна доминирующая группа пятен, а именно AR7794 (группа N142 по бюллетеню "Солнечные Данные") (N13 E77.5 26 октября 1994 года). Другая небольшая активная область (AR7792) с биполярной магнитной структурой была расположена около западного лимба (см. Рис. 19). Локальные источники, связанные с пятнами группы AR7794 и наблюдавшиеся в течение этого периода, показаны на спектрально - поляризационных сканах РАТАН-600 в диапазоне волн 2.6 - 9 см (см. Рис. 20 и Рис. 21). Номера соответствующих активных областей также даны на рисунках, сделанных по данным Кисловодской станции ГАС ГАО (см. "Солнечные Данные", N10-12, 1994).

Первый тип поведения поляризации иллюстрируется наблюдениями локального источника, связанного с активной областью AR7798 (N146, согласно бюллетеню "Солнечные Данные"). Эта область состояла из единственного доминирующего пятна северной (положительной) магнитной полярности. Радиоизлучение, связанное с этим пятном, имело правую круговую поляризацию $P = 90-95 \%$, показывая избыток необыкновенного излучения в соответствии с теорией циклотронного излучения над пятнами, согласно которой необыкновенное излучение на $\omega=3\omega_H$ преобладает по сравнению с излучением на второй гармонике гирочастоты $\omega=2\omega_H$ (см. [44]). В этом случае магнитное поле определяется соотношением: $B_{rad}=3570/\lambda$ для $\omega=3\omega_H$, где B в [Гс], а λ - в [см]. Как показано на Рис. 20 и Рис. 21, знак круговой поляризации AR7798 оставался постоянным. Главная особенность

группы - простота конфигурации - униполярная устойчивая группа в течение всего времени существования на диске. Можно предполагать, что конфигурация магнитосферы активной области была устойчива без проявления вспышечной активности. Над группами такого типа не наблюдалась активности в виде шумовых бурь.

Intensity: Oct. 29, 1994

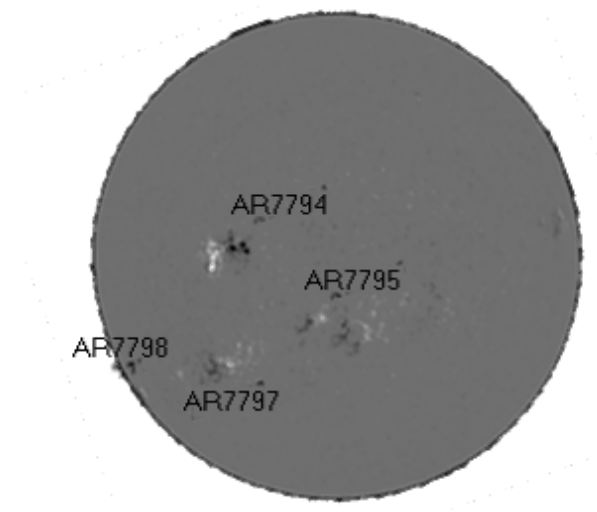
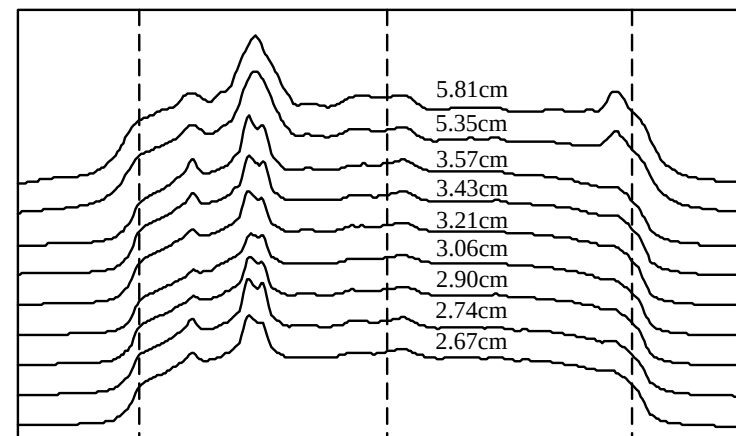


Рис. 19 Сканы полной интенсивности диска Солнца, полученные на РАТАН-600 за 29 октября 1994 года в сравнении с данными ГАС ГАО.

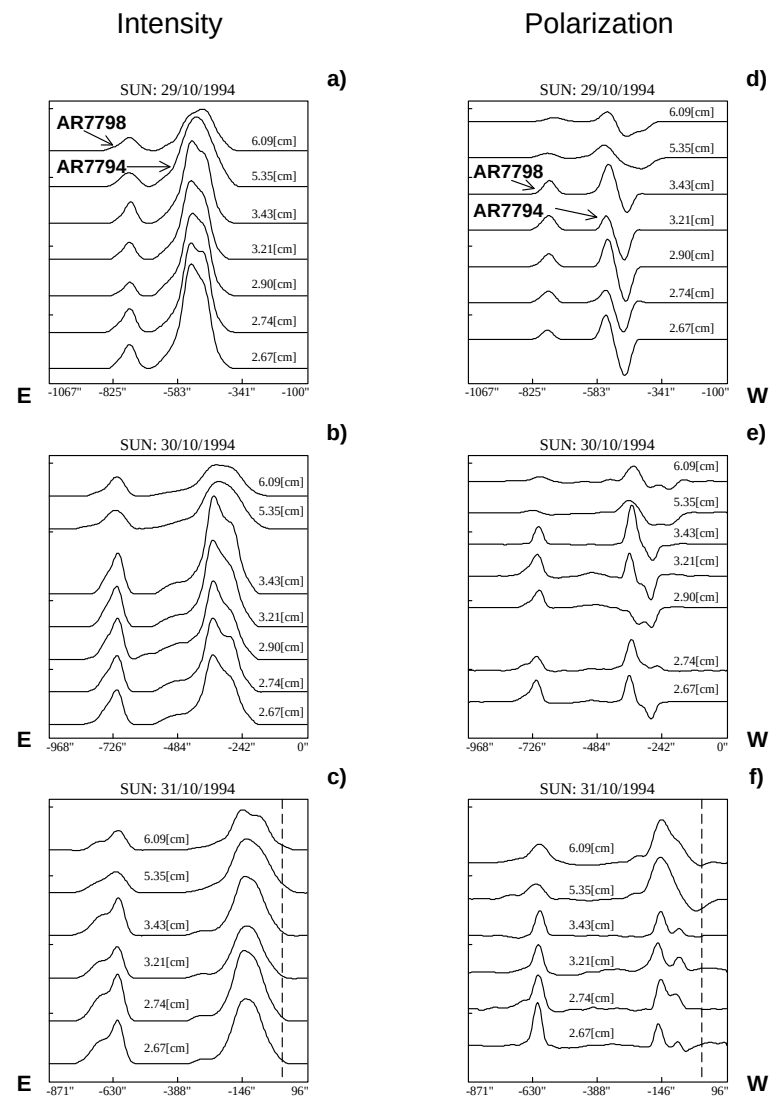


Рис. 20 Наблюдения активных областей AR7794 и AR7798 на РАТАН-600 в интенсивности и поляризации на нескольких волнах в течение периода 29-31 октября 1994 года

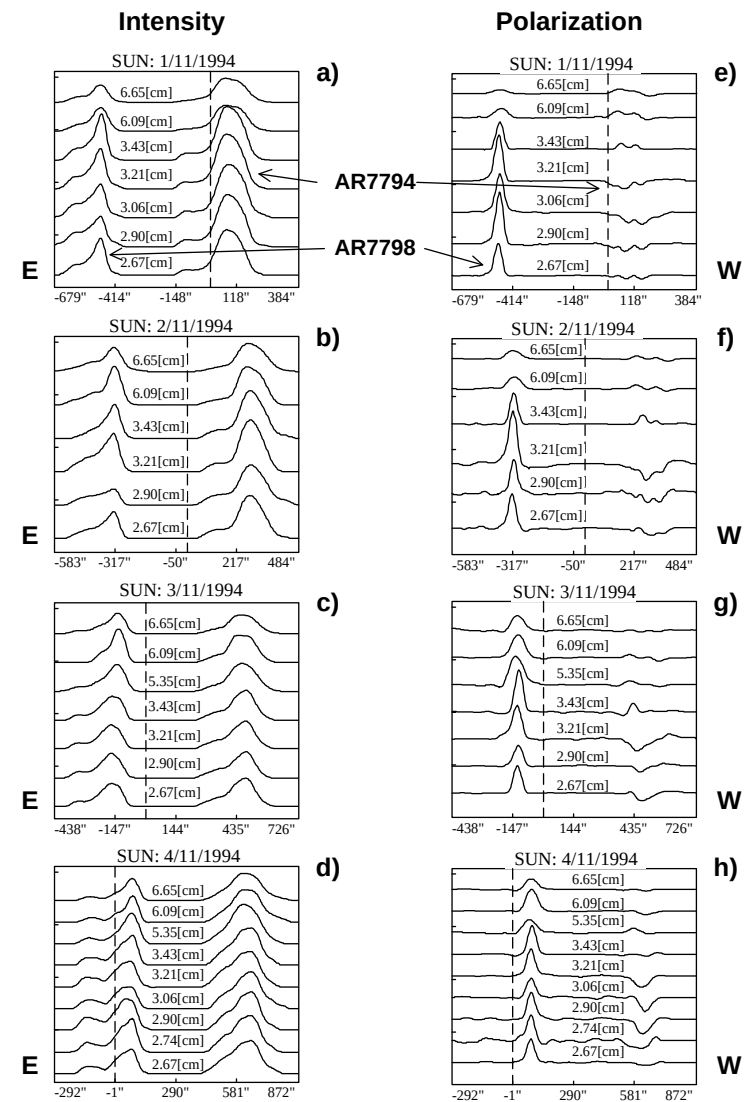


Рис. 21 Наблюдения тех же областей на РАТАН-600 в интенсивности и поляризации в течение периода 1-4 ноября 1994 года

Второй тип спектрально-поляризационных характеристик излучения пятенных источников иллюстрируется наблюдениями биполярной активной области AR7794, головная группа пятен которой имела отрицательную (южную) магнитную полярность, хвостовая группа пятен имела положительную (северную) магнитную полярность. Данные РАТАН-600 за 1, 2, 3 и 4 ноября (см. Рис. 21) показывают, что поляризация локальных источников, связанных с этими пятнами, изменила знак в некотором интервале длин волн. Как можно видеть на Рис. 21, радиоизлучение источников над этой группой пятен имело преобладающую левую поляризацию на волнах короче, чем 3.43 см и стало правополяризованным на более длинных волнах. Также заметно, что этот источник не показал никаких существенных изменений в общей интенсивности (см. Рис. 21) в этом диапазоне волн. Этот тип поведения поляризации можно объяснить как результат распространения, при котором радиоизлучение проходит через вышележащую область (QT) квази - поперечных магнитных полей в короне над активной областью.

Теория, объясняющая этот эффект, принадлежит Cohen [45] и в более развитой форме Железнякову [43]. Согласно этой теории, величина магнитного поля в QT-области есть функция критической длины волны, на которой происходит смена знака поляризации. Она определяется как:

$$B = 1.57 \times 10^8 \lambda^{-1} (\lambda N_e L_B)^{-1/3},$$

где N_e - электронная плотность плазмы в QT- области, L_B - характерный масштаб изменения магнитного поля.

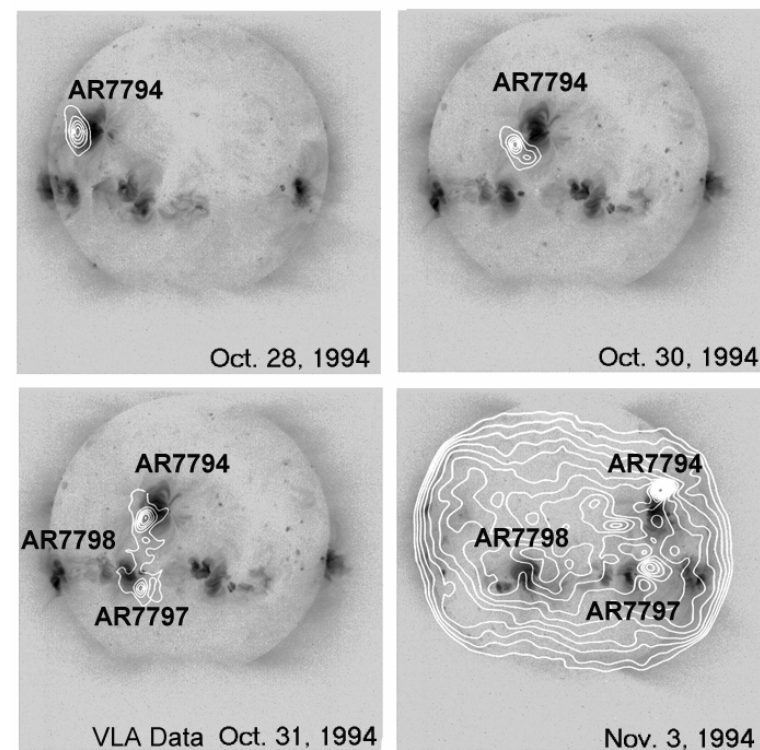


Рис. 22 VLA карты полной интенсивности на волне 91.6 см в сравнении с изображениями Солнца в рентгене (YOHKOH SXT) за 28,30,31 октября и 3 ноября 1994 года.

Третий тип поведения поляризации иллюстрируется данными, полученными в период между 29 и 31 октября, когда AR7794 была в восточном полушарии. Как можно заметить на Рис. 20, узкополосные изменения и в общей интенсивности и в круговой поляризации наблюдались от различных компонентов AR7794. 30 октября инверсия поляризации была обнаружена на волнах 2.74 см и 2.90 см, в то время как на волнах 2.67 и 3.21 см поляризация имеет тот же самый знак. При сравнении с другими днями

наблюдений за 28 и 31 октября 1994 г., поляризация активной области AR7798 (используемой в данном случае как опорный источник) оставалась постоянной по всему диапазону волн в течение всего времени ее нахождения на диске. Излучение двух других областей (AR7798 и AR7796), расположенных в южном полушарии, не влияло на наблюдения группы AR7794.

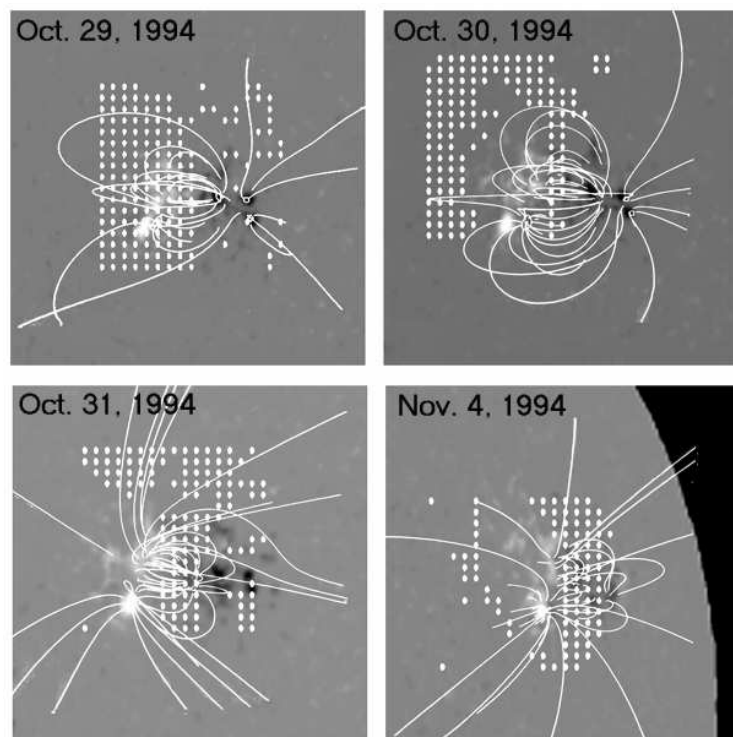


Рис. 23 Расчетная конфигурация магнитного поля, выполненная с использованием фотосферных магнитограмм обсерватории Kitt Peak за 29, 30, 31 октября и 4 ноября 1994 года. Кругами отмечены конфигурации QT- областей.

Расчеты, выполненные Р. Вильсоном (Тафтский университет, США), по экстраполяции распределения магнитного поля в корону (см. Рис. 23) показали, что QT- область поочередно покрывала то хвостовую, то головную часть группы пятен, однако поведение изменения знака круговой поляризации для 30 октября 1994года в диапазоне 2.74-3.21 см имеет более сложный характер (двойное изменение знака поляризации), чем это следует из теории QT-распространения. На Рис. 22 приведено сравнение карт VLA с изображениями в мягком рентгене спутника YOHKOH.

28 и 30 октября 1994 г солнечная шумовая буря была зарегистрирована на волне 91.6 см над активной областью AR7794, которая находилась в северо-восточном квадранте (см. Рис. 22). Ее излучение имело правую круговую поляризацию ($P \approx 90\%$) и было переменным во времени на интервале 10-20 минут. 31 октября 1994г на картах VLA излучение шумовой бури распространилось также и на вторую активную область AR7797, находившуюся на $10'$ к югу от AR7794 в южном полушарии (см. Рис. 22).

В этот день шумовая буря над AR7794 имела избыток левой поляризации ($P \approx 85\%$) и была смещена на $1'$ к востоку от хвостового пятна с положительной магнитной полярностью. Источник, связанный с активной областью AR7797, был правополяризованный ($P \approx 90\%$) и переместился на $2'$ к юго-западу от доминирующего пятна отрицательной магнитной полярности. В обоих случаях излучение шумовых бурь было поляризовано в обыкновенной моде, как и ожидалось для излучения плазменных волн на основной гармонике плазменной частоты. Временное развитие этих двух источников интересно тем, что за время пятичасового периода наблюдения источник шумовой бури, связанный с AR7794,

систематически уменьшался, в то время как источник, связанный с AR7797, увеличивался (см. [46]). Эти взаимные антикоррелирующие колебания интерпретировались как проявление крупномасштабных, трансэкваториальных магнитных петель, которые соединяли две области нетеплового высвобождения энергии.

3 ноября 1994 года интенсивность источников шумовых бурь значительно уменьшилась, что сделало возможным картографирование крупномасштабного излучения спокойного Солнца на 91.6 см (см. Рис. 22). Однако, локализованные пики излучения все еще оставались над активными областями AR7794 и AR7797, и это, вероятно, – остаточное излучение шумовых бурь, которые доминировали на 91.6 см на VLA картах в течение предыдущих дней наблюдения.

Более явный случай такого типа поведения поляризации наблюдался также в течение периода 15-17 июля 1995 года.

Период 15-17 июля 1995 года.

В течение этого периода в центральной части солнечного диска присутствовала только одна группа пятен, а именно AR7890, расположенная около центрального меридиана 16 июля. Оптические данные ГАС ГАО, также как и магнитограммы обсерватории Китт Пик, показали, что AR7890 имела биполярную магнитную структуру, которой соответствовала биполярная структура поляризации радиоизлучения (см. Рис. 24). Биполярная структура активной области сохранялась в диапазоне от 4 см до 12 см в течение периода с 15 по 17 июля. Сканы поляризации за 16

июля подобны сканам за 15 июля с одним важным исключением: в верхней части сантиметрового диапазона можно видеть результат двойного изменения знака поляризации. На волнах 6.91 см и 8.62 см структура поляризации AR7890 была биполярной, но на волне 7,73 см видно быстрое уменьшение правосторонней поляризации источника, связанного с головным пятном, а левополяризованный источник, связанный с хвостовым пятном, изменил знак поляризации на противоположный. На Рис. 24, также приведено сравнение с рентгеновскими данными спутника YONKON. Видно, что структура AR 7890 в течение 15 июля и 17 была достаточно простой, но 16 июля зафиксирована более сложная структура с образованием дополнительной арки. Это был период активности шумовой бури: положения источников шумовых бурь на 169 MHz (данные радиогелиографа Nancaу) отмечены крестиками на рентгеновских картах. Шумовые бури непосредственно были связаны с данной активной областью. Это явление также отличается от известного QT-эффекта. Временные и спектральные особенности и связь с шумовыми бурями дали основание предложить, что это явление могло быть результатом прохождения излучения через сложную магнитную структуру с токовыми слоями.

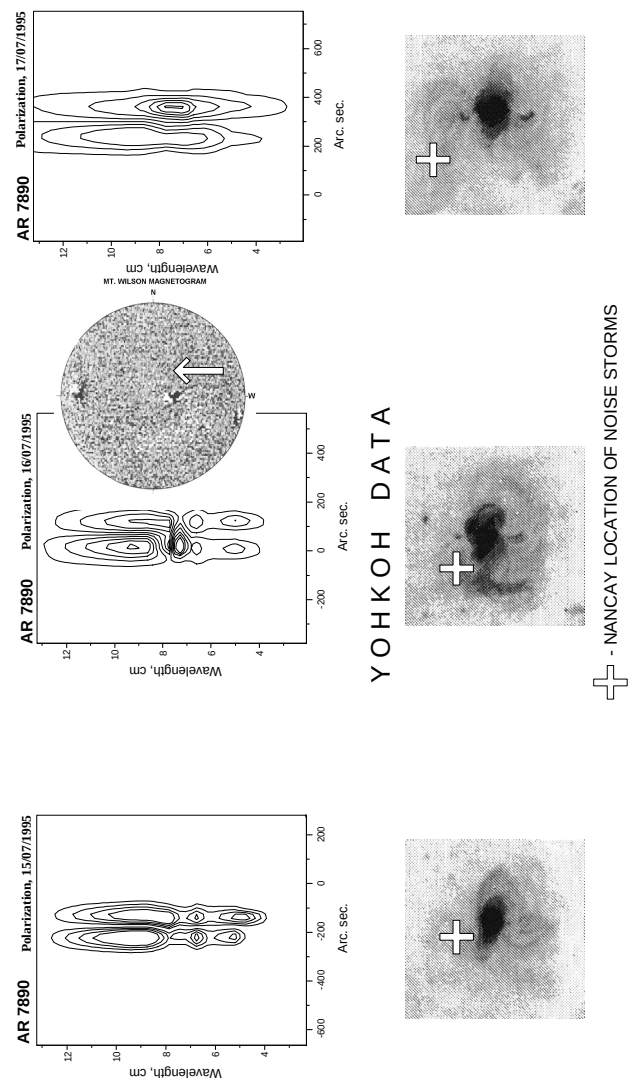


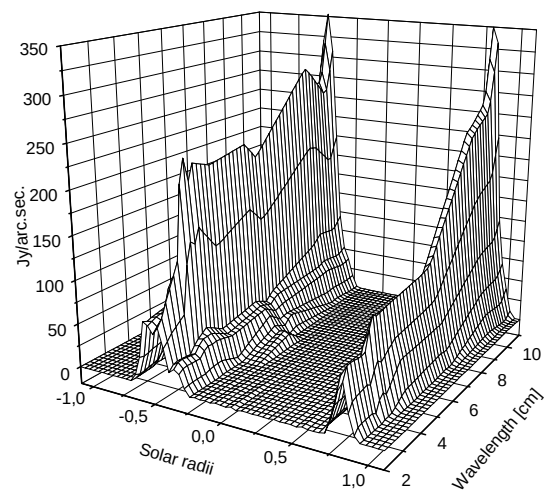
Рис. 24 Наблюдения круговой поляризации на РАТАН-600 группы AR7890 в течение периода 15-17 июля 1995 года в сравнении с наблюдениями спутника YONKON, обсерватории Nancay (164MHz) и магнитограммой обсерватории Mt. Wilson.

Наблюдения 27 марта, 1995

Здесь представлен эффект резкого изменения круговой поляризации излучения локальных источников в короткой части сантиметрового диапазона (см. Рис. 25). В течение этого периода, наиболее интенсивная шумовая активность, наблюдаемая на VLA (327 MHz) и радиогелиографе в Nancay(164 MHz) имела место 27 марта 1995 года и была связана с активной областью AR7858, которая располагалась в юго-восточном квадранте Солнца (см. Рис. 26).

На Рис. 25 показаны одномерные сканы в интенсивности и круговой поляризации в диапазоне волн 2.03 - 13.22 см, полученные на РАТАН-600. Здесь микроволновое излучение от восточной активной области AR7858 не показало никакой инверсии поляризации. Однако, были найдены существенные изменения потока радиоизлучения на волне 3.2 см. На более длинных волнах наблюдалось увеличение потока в интенсивности и уменьшение степени круговой поляризации, что является типичным. Из сопоставления с картой магнитных полей обсерватории Mt. Wilson следует, что этот необычный поляризованный источник располагался над нейтральной линией магнитного поля. Это наблюдение – пример типового пекулярного источника с нетепловым механизмом радиоизлучения (см.[37]). Но и в этом случае, согласно данным VLA, интенсивные шумовые бури были обнаружены над данной активной областью (см. Рис. 26).

Интенсивность



Поляризация

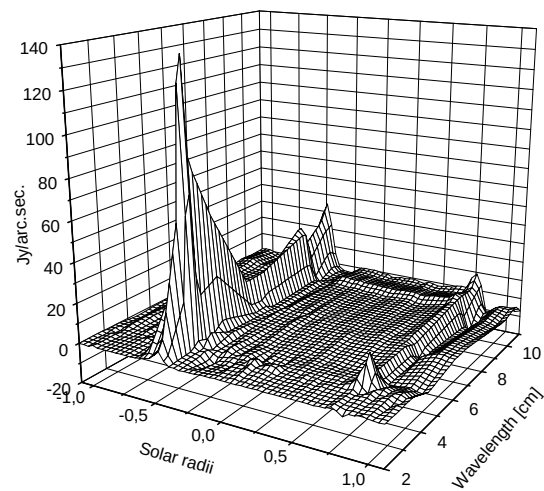
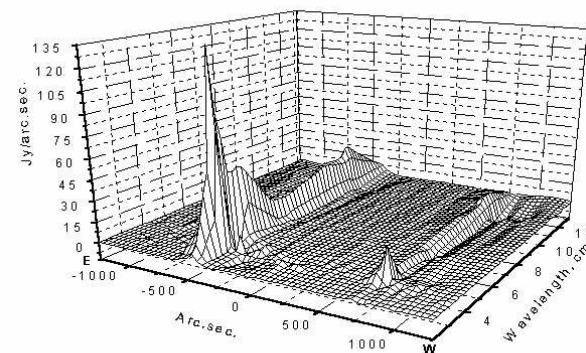
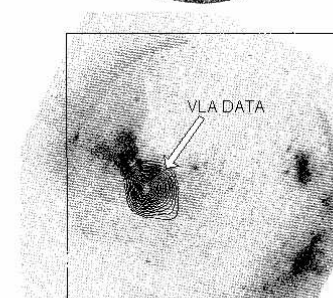
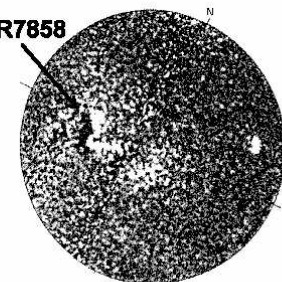


Рис. 25 Сканы в интенсивности и круговой поляризации, полученные на ПАНА-600 за 27 марта 1995



MT. WILSON MAGNETOGRAM

AR7858



Y
O
N
K
O
H
D
A
T
A

Рис. 26 Сравнение сканов Солнца в круговой поляризации за 27 марта 1995 года, полученных на ПАНА-600, с магнитограммой Mt.Wilson, изображением в рентгене(YONKOH) и VLA картой на волне 91.6 см.

Обсуждение результатов наблюдений

Необычные спектральные особенности круговой поляризации, зарегистрированные на многоволновом панорамном анализаторе спектра РАТАН-600 с 5% частотным разрешением, сравнивались с результатами модельных расчетов, выполненных Р. Вильсоном (Тафтский университет, США) в нашей совместной работе [47].

Для периода 29 - 31 октября была выполнена экстраполяция магнитного поля в корону на основе метода Sakurai [48], с использованием данных фотосферных магнитных полей обсерватории Китт Пик в качестве граничных условий на фотосфере. В результате, были рассчитаны магнитные силовые линии и потенциальная структура магнитного поля на определенной высоте над поверхностью Солнца. Эта процедура выполнена для многих высот при построении трехмерной структуры магнитного поля в короне над активной областью. Также были определены общая напряженность и направление магнитного поля $B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2}$ для всех высот.

На Рис. 23 показаны результаты вычислений распределения магнитных полей группы AR7794, сделанные для 29-31 октября и 4 ноября 1994 года. Для 29 и 30 октября можно видеть биполярную структуру излучения поляризации активной области и положение QT- области (пунктирная поверхность), расположенной к востоку от хвостового пятна и не охватывающей пятна. На Рис. 20 показана биполярная структура поляризации во всем микроволновом диапазоне. Спектрально-поляризационные наблюдения этой группы

за 30 октября на РАТАН-600 обнаружили интересное явление изменения знака поляризации в коротком диапазоне волн 2.67 - 3.21 см (см. Рис. 20) для обоих локальных источников. На Рис. 23 за 31 октября и 4 ноября показан случай, где QT- область покрывает хвостовое пятно AR7794.

На следующий день 31 октября перестройка AR7794 была закончена, и активная область перешла в другое устойчивое состояние. Биполярная структура AR7794 сменилась на конфигурацию с правой поляризацией для обоих локальных источников. Сравнение с расчетами, представленными на Рис. 23 показало, что источник, связанный с западным пятном, изменил знак, вследствие покрытия его QT-поверхностью. И в дальнейшем локальный источник, связанный с западным (W) пятном группы AR 7794, продолжал изменять свою поляризацию в течение всего времени перемещения по диску.

Таким образом, шумовые бури в метровом диапазоне волн связаны с активными областями, чье микроволновое излучение показало необычные спектральные изменения поляризации. Так как ни шумовые бури, ни узкополосные инверсии поляризации не происходят над всеми активными областями, можно предположить, что эти два явления могут быть связаны с окружающим магнитным полем. Шумовые бури, как известно, генерируются плазменной турбулентностью, которая возникает, когда ускоренные частицы созданы в результате пересоединения магнитных полей в короне над солнечными активными областями. Те же самые магнитные поля могут также создавать в короне области, где поляризация проходящего снизу микроволнового излучения, изменяет знак, возможно, в областях квазиперпендикулярных магнитных полей или

тонком токовом слое. Вообще говоря, инверсия знака поляризации происходит, когда луч зрения к наблюдателю пересекает область, где направление продольного магнитного поля изменяет знак.

Наблюдаемая инверсия поляризации может также происходить, если излучение на различных частотах исходит от различных мест в пространстве. Из-за различий в распространении через область инверсии некоторые части радиоисточника могут показывать инверсию поляризации, в то время как другие нет. Существуют два основных типа геометрии магнитных полей в короне, в которых может происходить инверсия, а именно QT-области и токовые слои. Для QT-областей магнитное поле перпендикулярно направлению луча зрения, в то время как для токовых слоев магнитное поле сконцентрировано в пределах тонких областей сильных локальных токов.

Известны два различных типа токовых слоев, а именно слой, в котором общее внутреннее магнитное поле является нулевым, а также слой, в котором нулевым является поперечное магнитное поле. В зависимости от характера слоя результирующий спектр поляризации может быть различен. Наиболее существенным и хорошо изученным экспериментально является случай инверсии поляризации при распространении в QT-области. Этот случай описывается параметром (см. [49]):

$$G_{\perp} = \frac{\pi \omega_p^2 \omega_B^2 L_{\alpha}}{8c \omega^4}, \quad (3.1)$$

где ω_p - плазменная частота, ω_B - циклотронная частота, L_{α} - характерный пространственный масштаб.

Для случая QT- области мы имеем очень сильную степенную зависимость инверсии от частоты (в согласии с нашими

наблюдениями). В то же самое время для объяснения многократной инверсии поляризации нужно иметь несколько пересекающихся QT- областей на луче зрения.

В случае токового слоя с поперечным магнитным полем, связь между модами (обыкновенной и необыкновенной) описывается параметром:

$$G_{\perp s} = \frac{\omega_p^2 \omega_B^3 L_s}{\sqrt{2} c \omega^4} \frac{B_{\perp}^4}{B_0^4 \tan^5 \beta}, \quad (3.2)$$

где ω - частота излучения; ω_p - плазменная частота; ω_B - гирочастота; L_s - характерная толщина токового слоя; B_0 - величина магнитного поля на краях слоя; $B_{\perp}$ - поперечная компонента магнитного поля; β - угол между направлением луча и компонентой поля $B_{\perp}$.

Нужно заметить, что случай нейтрального токового слоя, по-видимому, не имеет особого интереса, поскольку характерный параметр связи мод не зависит от частоты:

$$G_0 = \frac{8 \sqrt{2} \omega_p^2 \cos^3 \alpha L_B}{c}. \quad (3.3)$$

Здесь L_B - характерный пространственный масштаб магнитного поля B ; α - угол между направлением луча и магнитным полем.

При исследовании инверсии знака поляризации по ранним наблюдениям на РАТАН-600 было установлено, что она хорошо согласуется с теорией распространения радиоизлучения через область с квази - поперечным магнитным полем [44]. Это подтверждали и модельные расчеты по экстраполяции магнитных полей в корону [99].

В нашем случае наблюдения показывают значительно различающиеся ситуации:

1. Инверсия происходит при весьма различных положениях активных областей на диске;
2. Часто наблюдаются случаи многократной инверсии на ряде волн и изменение знака поляризации происходит на одной или двух волнах в спектральных наблюдениях с разрешением по частоте в 5%;
3. Для анализа отбирались активные области, главным образом, связанные с шумовыми бурями на метровых волнах;
4. Не отмечалось регулярного изменения эффекта инверсии изо дня в день.

Таким образом, существует достаточно оснований для поиска другого объяснения инверсии, не связанного с QT - областями.

Возможными областями инверсии могут быть токовые слои, по крайней мере, для некоторых из активных областей. Токовые слои могут возникать как результат появления новых магнитных потоков и быть областями ускорения электронов, ответственных за генерацию шумовых бурь.

С другой стороны, в токовом слое инверсия направления продольной компоненты магнитного поля может происходить по всему токовому слою и не строго зависит от положения активной области на диске относительно направления луча зрения к наблюдателю.

Следует отметить, что теория распространения радиоволн через токовые слои пока, по видимому, детально не разработана.

Двойные и неоднократные инверсии знака круговой поляризации пока не находят удовлетворительного объяснения в существующих публикациях. Возможно, следует рассматривать и другие геометрии с инверсией продольной компоненты магнитного

поля, такие как магнитные поля с широм, существование которых известно из фотосферных данных. Они, по-видимому, более вероятны в короне, чем токовые слои с простой симметричной геометрией.

Таким образом, сравнение микроволновых спектрально-поляризационных наблюдений активных областей, сделанных на РАТАН-600, с наблюдениями шумовых бурь на интерферометре VLA и радиогелиографе Nancaу, а также с наблюдениями в рентгене, сделанными со спутника YОНKОН, показало несколько различных типов спектральных и временных особенностей круговой поляризации локальных источников в микроволновом диапазоне, которые были связаны с активными областями, генерирующими шумовые бури.

Выводы

В данной главе описаны результаты наблюдений тонкой спектральной структуры круговой поляризации радиоизлучения локальных источников над пятнами. Они заключаются в следующем:

1. Обнаружено новое необычное явление - неоднократная смена знака круговой поляризации.
2. Установлено, что это явление наблюдается в активных областях, которые сопровождаются шумовыми бурями, наблюдаемыми в метровом диапазоне волн.
3. Модельные расчеты показывают, что данное явление нельзя полностью объяснить существующими теориями (например, инверсией знака круговой поляризации, вследствие прохождения излучения через область с квази-поперечным магнитным полем)

и необходимо рассматривать другие теории (например, токовые слои с широм и др.).

ГЛАВА 4. Залимбовые наблюдения протуберанца 4 октября 1996.

Введение

В последнее время резко возрос интерес к протуберанцам как в области теории (в связи с открытием сохранения спиральности их магнитных полей), так и ввиду тесной связи эруптивных протуберанцев с мощными вспышками и корональными выбросами массы. Хотя основная информация в этой области получена оптическими методами наблюдений, радионаблюдения дают много независимой и дополнительной информации.

Обзор наблюдений и теоретических аспектов протуберанцев дан в монографиях: Priest [65] и Tandberg-Hanssen [66] и обзорах: Schmieder [57]; Demoulin and Raadu, [67]; Chiuderi Drago [51], [52]; Fontenla [59]; Kuijpers, 1997 [68], Engvold O. [69].

Классические представления.

Спокойные протуберанцы - это крупномасштабные, плотные и холодные вертикальные слои плазмы в короне с плотностью (порядка 10^{11} см^{-3}) в 500 раз больше окружающей короны и температурой (5000 - 10000 K) в 500 раз ниже. Они стабильны по форме, долгоживущи и в проекции на диск видны как тонкие темные волокна. Для них характерно наличие мелкомасштабной структуры и внутренних движений, с нисходящими потоками

вещества в областях "ног-оснований", опускающихся до хромосферы. На некоторых стадиях развития возможна неустойчивость, приводящая к их подъему и исчезновению (эруптивная стадия). Главными вопросами для этих объектов остаются до сих пор следующие: как они образуются, как они поддерживаются, какова природа их тонкой структуры и оснований, почему они взрываются и др.

Результаты оптических наблюдений.

1. Геометрия протуберанцев соответствует тонкому вертикальному слою, лежащему над линией раздела полярностей фотосферных магнитных полей. Длина слоя в пределах 60 - 600 Мм (типичное значение около 200 Мм), высота слоя в пределах 10 - 100 Мм (типично 50 Мм), а их ширина (толщина слоя) в пределах 4 - 15 Мм (типично 6 Мм).
2. Плотность в пределах 10^{10} - 10^{11} см^{-3} , температура в пределах 5000 - 8000 K, с тенденцией ее роста с высотой.
3. Магнитное поле на высотах более 10 Мм относительно однородное, почти горизонтальное с наклоном около 20 град. относительно оси протуберанца. Величина магнитного поля в пределах 3 - 30 Гс (типично 5 Гс) и обычно растет с высотой (до 50%).
4. По измерениям Leroу [70] высокоширотные протуберанцы имеют высоты больше 30 Мм, а их магнитные поля (5 - 10 Гс) имеют инверсную полярность (для которой магнитное поле вдоль протуберанца направлено противоположно направлению фотосферного поля). Низкоширотные протуберанцы около активных областей обычно

низколежащие (ниже 30 Мм), и имеют более сильные поля около 20 Гс нормальной полярности. Наблюдения Ким [71] подтверждают эту закономерность для высокоширотных протуберанцев, однако некоторые низкоширотные протуберанцы с аномально низкой высотой также имеют инверсную поляризацию.

5. Протуберанцы являются долгоживущими образованиями (1 - 300 суток), в особенности высокоширотные (типично 140 дней).
6. Наблюдаемые скорости потоков в протуберанце заметно меньше скоростей свободного падения (около 100 км/с), поэтому плазма близка к гидростатическому равновесию в условиях баланса всех сил (газового и магнитного давления, гравитации). Они возникают над областями сходящихся и сдвиговых течений на фотосфере.
7. Протуберанцы во флоккульных площадках и активных областях имеют размеры в 3 - 4 раза меньше, чем протуберанцы вне этих областей. Для них характерны низкие высоты и более высокие значения плотности (более 10^{11} см^{-3}) и магнитного поля (20-100 Гс), и сильные горизонтальные потоки.
8. По наблюдениям на лимбе видны нисходящие вертикальные структуры, длиной 5-7 Мм и шириной 0.3-1 Мм, с низким филлинг-фактором (0.01-0.1).
9. Многочисленные "ноги" протуберанцев (с типичным разном около 30 Мм) достигают фотосферы в областях границ супергрануляции.

Современная концепция протуберанцев, основанная на УФ и рентгеновских наблюдениях на КА, значительно отличается от классических представлений. В ее основе лежит представление о комплексе активности, в котором холодное волокно является лишь одной из компонент. Согласно этим представлениям, в области раздела полярностей фотосферных магнитных полей в результате сдвиговых и крутящих движений возникают две системы арочных структур магнитного поля. В результате тепловой неустойчивости одна система арок разогревается до корональных температур (корональная аркада), тогда как в другой системе арок вещество охлаждается до нескольких тысяч градусов (холодное волокно), с корональной полостью между ними. В наиболее развитых моделях такого типа [68] становится возможным объяснить как механизм образования протуберанцев (подъем силовых трубок вверх при скручивании их оснований), так и механизм их теплового баланса (диссипация токов скрученных трубок поля), в отличие от классических моделей Киппенхана-Шлютера и Куперуса-Рааду (см обзоры [57],[65]). Другим важным открытием последних лет стало обнаружение закона сохранения спиральности крупномасштабного магнитного поля в волокнах: закрученность протуберанцев в северной и южной полусферах Солнца противоположна, как и знаки тороидальных магнитных полей, поэтому знак их произведения (спиральность) одинаков [72].

Микроволновые наблюдения

Радионаблюдения протуберанцев ведутся с 1959 г. в широком диапазоне волн (от мм до метров) на базе параболических антенн (РТ-22 ФИАН, КРАО, Бонн) и крупных радиотелескопов (РАТАН-

600, интерферометры WSRT и VLA). Микроволновые наблюдения имеют заметную специфику в сравнении с оптическими - холодное волокно практически непрозрачно для радиоволн. Например, для типичных значений температуры и плотности волокна $T=7000$ К, $N=5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ глубина проникновения тормозного радиоизлучения лежит в диапазоне 120 км - 100 м в диапазоне волн 0.3 - 10 см. Таким образом, исследования собственно протуберанцев возможно только с использованием очень коротких волн порядка 1 см. Напротив, более длинные волны дают интересную информацию относительно переходной области (PCTR-Prominence Corona Transition Region), а метровые волны наиболее информативны в динамических корональных явлениях (эруптивные протуберанцы). Подробный обзор результатов таких наблюдений дан в обзоре [52]. Многие из приведенных там результатов к настоящему времени устарели в связи с появлением новых более совершенных инструментов (радиогелиограф Nobeyama на частоте 17 ГГц), перекалибровкой спектров радиояркости спокойного солнца, совершенствованием методики интерферометрических наблюдений на VLA, развитием спектрально-поляризационных наблюдений на РАТАН-600.

В диапазоне мм и см волн волокна и протуберанцы на картах радиояркости выглядят аналогично наблюдениям в H_{α} : а именно, как темные структуры на диске и как яркие на лимбе. Среди немногочисленных наблюдений на лимбе отметим спектральные наблюдения эруптивного протуберанца на РАТАН-600 [73] и в Нобеяма [74].

Первые наблюдения "радио волокон" в мм диапазоне были выполнены Хангильдиным в 1959 на 22 м параболоиде на волне 8

мм с разрешением 1.7' [75]. В этой работе была впервые дана интерпретация наблюдений, ставшая классической: в предположении, что радиоволокно является оптически толстым, а его радиояркость меньше радиояркости хромосферы, наблюдаемая депрессия радиояркости обусловлена экранированием радиоизлучения нижележащей хромосферы.

Модель волокна, целиком основанная на микроволновых наблюдениях в мм диапазоне (4 - 8.6 мм), была построена Апушкинским и Топчило [76]. Они использовали выборку 70 наблюдений из 370 наблюдений на трех крупнейших телескопах СССР и построили модель, в которой электронная температура монотонно возрастает от 6300 до 8300 К.

Депрессии радиояркости (в мм диапазоне) на диске часто предшествуют (за несколько суток) возникновению оптических волокон в H_{α} (см. [77], [78]).

Ассоциация оптических волокон с депрессией радиояркости была статистически исследована Schmahl et al [79], которые нашли, что только 2/3 случаев депрессии на частоте 22 ГГц сопровождаются оптическими волокнами, но все они за редкими исключениями лежат на линии раздела ("нейтральные линии") полярностей фотосферных магнитных полей.

Первые наблюдения волокон в см диапазоне волн были осуществлены на 10 лет позднее, чем в мм диапазоне, Chiuderi Drago and Felli [80] на 140-футовом радиотелескопе NRAO с угловым разрешением 2.1' на волне 1.95 см. Для интерпретации наблюдений в этом диапазоне авторы впервые предложили связать депрессию радиояркости с уменьшением радиотолщи корональных слоев над высоким протуберанцем.

В течение последующих лет было получено несколько радиокарт с депрессиями радиояркости вплоть до волны 11 см, в основном с помощью 100-м телескопа Effelberg, 40-м парабооида в Haystack и, впоследствии, на VLA (см. [52]). Вследствие низкого углового разрешения этих наблюдений стал актуальным и широко обсуждался вопрос о ширине волокон в оптическом и радиодиапазонах. Хотя большинство авторов склонялись к выводу о росте диаметра волокна с ростом волны относительно оптических измерений, результаты обширных статистических исследований (см. [81]) показали, что оптические и радиоразмеры волокон существенно одинаковы в диапазоне волн от 1.2 мм до 6 см. Эта проблема является ключевой для определения яркостной температуры радиоволокон, определяющей их физическую природу.

Проблема структуры переходной области от протуберанца к короне.

Переход от протуберанца к короне, как и от хромосферы к короне, может исследоваться как с помощью наблюдений интенсивности УФ линий и их профилей, так и яркости микроволнового излучения в диапазоне волн 1-20 см. Из наблюдений УФ интенсивности в линиях, Schmahl and Orral [82], Engvold et al [83] измерили так называемое распределение дифференциальной меры эмиссии по температуре (DEM(T)), с учетом поверхностного филлинг- фактора относительно разрешающей способности инструмента. По этим данным можно было рассчитать ожидаемое микроволновое тормозное излучение той же плазмы. Результаты таких расчетов привели к яркостным

температурам радиоизлучения значительно выше наблюдаемых [52]. Возможная причина этих расхождений была приписана тому, что УФ наблюдения относились к лимбу, а радионаблюдения к центру диска. Проблема осложнялась и тем, что УФ наблюдения на диске вообще не чувствительны к присутствию и отсутствию волокон на фоне излучения спокойного Солнца [84].

Исследования PCTR тесно связано с выяснением природы мелкомасштабности волокон, наблюдаемой в H_{α} . Если тонкие нити, наблюдаемые в H_{α} , действительно являются холодными волокнами, погруженными в горячую плазму корональной полости, то переходные слои будут существовать вокруг каждого из них, и филлинг-фактор будет играть важную роль при расчетах DEM. Если же напротив, как предположили Einaudi and Raadu [85], видимая в H_{α} мелкомасштабность есть лишь проявление поверхностных волн плотности в холодном волокне, то тогда будет существовать одна общая PCTR как оболочка всего волокна, и тогда анализ PCTR должен проводиться, как для однородных моделей волокна.

По-видимому, существуют оба типа неоднородностей волокон. Согласно измерениям магнитного поля [70], вертикальные неоднородности (в основаниях) перпендикулярны магнитному полю и соответствуют флуктуациям плотности в изотермической плазме. Напротив, горизонтальные либо спиральные волокна, параллельные силовым линиям, могут быть тонкими прядями, которые способны существовать в окружении горячей плазмы благодаря высокой теплоизоляции поперек силовых линий магнитного поля.

Только УФ наблюдения сверхвысокого разрешения на КА могут решить эту проблему (см. [86]). Однако, радионаблюдения на

крупных инструментах дают независимую и дополнительную информацию. Если PCSTR действительно множественные, вокруг каждого волокна, то в радиоизлучении они будут, практически, полностью заэкранированы самими волокнами, ввиду их огромной непрозрачности для радиоволн (холодная плазма). Таким образом, отсутствие заметной PCSTR в микроволновом излучении свидетельствует в пользу множественной PCSTR, и наоборот.

Ключевой проблемой остается и вопрос о структуризации вещества PCSTR, который вполне аналогичен случаю переходной зоны в атмосфере спокойного Солнца. Как неоднократно отмечалось в работах по исследованию микроволнового излучения спокойного Солнца (см. [87], [88]), наблюдаемые радиоспектры яркости не дают указаний на существование вклада такого вещества в наблюдаемое радиоизлучение. Поскольку наличие такого вещества надежно установлено по УФ наблюдениям, возникла проблема поиска такой пространственной структуры переходной области, которая уменьшила бы его вклад в наблюдаемую радиояркость. Такое вещество не может быть связано ни с плоско-слоистыми, ни с петлевыми структурами, которые приводят к недопустимо высокому уровню излучения переходного слоя. По-видимому, вещество TR (Transition Region) и PCSTR сосредоточено в мелкомасштабных изотермических структурах, которые из-за высокой непрозрачности не дают вклада в микроволновое излучение. Как отмечает Chiuderi Drago (см. [89]), эта точка зрения подтверждается результатами УФ наблюдений. Athay and Dere [90] по анализу многочисленных линий в УФ заключили, что температурные градиенты в атмосфере спокойного Солнца имеют сильную поперечную компоненту и, по всей видимости, атмосфера состоит из смеси холодных и горячих

магнитных петель, а не из совокупности горячих петель с холодными основаниями.

Существование, энергетика и механизмы поддержания такой неоднородности солнечной плазмы относятся к фундаментальным проблемам физики солнечной короны, в решение которых вклад радиоастрономических исследований оказался решающим. Первые модели переходного слоя в протуберанцах были разработаны в работах Kundu на основе многочастотных наблюдений в см диапазоне волн (см. [91]) и, дополненные наблюдениями на волнах 6 и 20 см на VLA, привели к концепции широкой переходной области, подвергнутой пересмотру в работах Chiuderi Drago. В работе [52] были скомпилированы результаты всех наблюдений и построен совокупный частотный спектр дефицита радиояркости над волокном, на основе которого, впоследствии, разработаны много-волоконные модели PCSTR, согласующиеся с результатами УФ измерений DEM(T) (см. [51], [92]).

Следует отметить, что улучшение техники абсолютных калибровок радионаблюдений Солнца в конце 80-х годов (см. [88]) поставило под сомнение результаты оценок спектров радиояркости над протуберанцами и привело к пересмотру самой концепции переходной области. Современные радиоспектры (спокойного Солнца) вообще не дают указаний на вклад радиоизлучения переходной области в наблюдаемую радиояркость (см. [58]).

Микроволновая поляризация и оценки магнитных полей

В присутствии магнитного поля возникает круговая поляризация тормозного радиоизлучения плазмы (см., например, [43]). Применительно к протуберанцам, слабые магнитные поля

($B_{\max} < 100$ Гс) полностью исключают вклад гирорезонансного излучения вплоть до дециметрового диапазона, однако это приводит к очень низким ожидаемым значениям степени круговой поляризации (не более нескольких процентов).

Поскольку, излучение оптически толстой среды неполяризовано, а в среде с низким градиентом температуры (холодное волокно) поляризация сильно ослаблена, то измерения магнитных полей возможны лишь в диапазоне мм волн, где они дают информацию о верхних слоях волокон, тогда как измерения в см диапазоне более информативны для переходной области и короны.

Ввиду этих трудностей, существующие измерения поляризации микроволнового излучения протуберанцев немногочисленны: наблюдения Апушкинского с коллегами в мм диапазоне волн на РТ-22 КРАО [62] и спектральные наблюдения эруптивного протуберанца на РАТАН-600 [73] в см диапазоне (поляризация не обнаружена на пределе 2%). Для оценки магнитных полей в плазме по измерениям поляризации используются два подхода. В работах Корольков, Парийский, Соболева [93], Гельфрейх [94], Bogod and Gelfreikh [63] используется связь параметра Стокса V с крутизной наклона спектра интенсивности $T_B(\lambda)$, а коэффициент связи пропорционален магнитному полю. Однако, как отмечалось в работах Гребинского ([95], [96]) такой подход справедлив, если только наблюдаемый спектр поляризации соответствует закону: $V(\lambda) \sim \lambda^3 \exp(-a \lambda^2)$, поэтому для измерения магнитных полей необходимы широкополосные спектральные наблюдения интенсивности и поляризации излучения.

К настоящему времени выполнены только измерения магнитных полей, относящихся к приполярным протуберанцам в миллиметровом диапазоне волн [97]. Полученные значения магнитных полей (порядка 10 Гс) согласуются с результатами оптических наблюдений. Это перспективное направление в будущем может дать новую информацию о магнитных полях в горячих слоях протуберанцев, недоступных для оптических измерений магнитных полей (по эффектам Зеемана и Ханле).

Приведенный обзор указывает на существование ряда нерешенных проблем, относящихся к фундаментальным проблемам солнечной физики и перспективность их исследования радиоастрономическими методами.

В период 1.09.96 - 20.12.96 на радиотелескопе РАТАН-600 (САО РАН) были проведены циклы наблюдений для наземной поддержки текущих программ по исследованию волокон на европейском спутнике SOHO. В этот период были зарегистрированы многочисленные структуры, связанные с долгоживущими (до нескольких оборотов) спокойными волокнами на диске и лимбе.

По оптическим наблюдениям протуберанцы биполярных флоккулярных площадок являются сложным комплексом горячих корональных аркад (излучающих с $T > 2$ МК в мягком рентгене в их вершинах, и линиях железа Fe IX в их основаниях с $T = 1.2$ МК), радиальных стримеров внутренней короны (по наблюдениям в линии FeIV) и холодных волокон (в линиях H_α). Для построения трехмерной картины таких комплексов необходимо сочетание наблюдений в центре и на лимбе диска с привлечением радиоастрономических наблюдений.

В настоящей работе основное внимание уделено отождествлению оптических и радиодеталей крупного протуберанца по его наблюдениям около центра диска (25.09.1996) и на лимбе (04.10.1996), с использованием двумерных изображений на частоте 17 ГГц (радиогелиографа в Nobeyama) и многоволновых наблюдений на РАТАН-600 (40 частот в диапазоне волн 1.8 - 15 см в интенсивности и поляризации) [50].

Существующие гипотезы о роли корональных аркад в формировании устойчивых протуберанцев с левой или правой спиральностью с "dextral" или "sinistral" ориентацией относительно аркады предсказывают, что для обеих конфигураций скрученные волокна имеют азимутальную компоненту поля, противоположную направлению поля в вершине корональных аркад, и пересоединения в этой области должны приводить к повышенному энерговыделению, диагностика которого в радиоизлучении и является предметом исследования.

Материалы наблюдений

Для настоящего исследования использованы результаты наблюдений на РАТАН-600 в диапазоне частот 2.6 GHz - 17.4 GHz (параметры Стокса I и V), опубликованные двумерные изображения спутника SOHO (EIT, FeIX, 171Å; LASCO- C1, FeXIV, 5303Å, на диске и в короне), рентгеновские наблюдения спутника YONKON и карты, полученные на радиогелиографе Nobeyama (Япония) на частоте 17 GHz (интенсивность I=R+L).

Морфология активной области вблизи центра диска Солнца (наблюдения 24-25 сентября 1996 г.)

На Рис. 27 приведены изображения всего диска для 25 сентября 1996г. на волне 1.76 см (данные Nobeyama), в мягком рентгене SXT(данные спутника YONKON), магнитограммы обсерватории Mt. Wilson и одномерные сканы РАТАН-600.

Диаграмма РАТАН-600 в этих наблюдениях имела следующие размеры в горизонтальном θ_{hor} и вертикальном θ_{vert} сечениях в соответствии с выражениями: $\theta_{hor} (arc\ sec) = 0.85\lambda (cm)$, $\theta_{vert} (arc\ min) = 0.75\lambda (mm)$

Оценки характеристик излучения АО проводились с учетом направления сканирования, величины позиционного угла Солнца и размера вертикальной диаграммы РАТАН-600. Из приведенных данных следует, что волокно находится в окружении флоккульных площадок, которые являются основаниями корональной арки. В микроволновом диапазоне волокно видно в виде депрессии излучения с $T_b = 7000\ K$ на фоне спокойного Солнца с $T_b = 10000\ K$ (согласно наблюдениям в Nobeyama). По наблюдениям на РАТАН-600, волокно также проявляется как депрессия на коротких волнах $\lambda < 6\ cm$ и как уярчение на более длинных волнах (относительно спокойного Солнца). Окружающие волокно флоккульные поля образуют яркий биполярный источник с резким ростом потока излучения с длиной волны. Рентгеновские наблюдения YONKON указывают на существование горячей плазмы $T_e > 2 \cdot 10^6\ K$ над волокном, что может быть интерпретировано как вершина корональной арки над протуберанцем.

Следует отметить, что эта же область наблюдалась и на предыдущем обороте Солнца с, практически, той же морфологией.

Это позволяет локализовать наблюдаемые характеристики в центре диска при интерпретации наблюдений той же области и над лимбом.

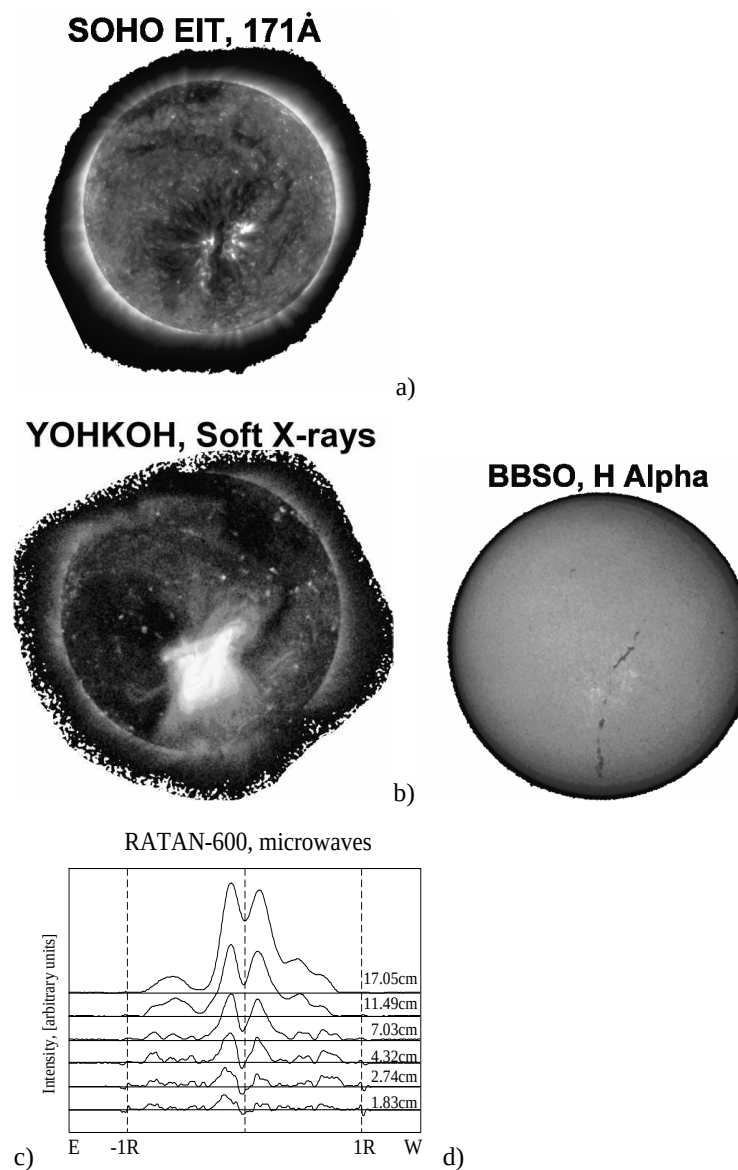


Рис. 27 Наблюдения Солнца за 25 сентября 1996 года, выполненные в различных диапазонах волн. Биполярная активная область (в центре диска) состоит из волокна и

окружающего флоккула над которым располагается высокотемпературная аркада. В радиодиапазоне отмечаются все эти структуры: на коротких волнах (до 3см) регистрируется холодное волокно; на средних волнах (3-7см) регистрируется повышенное излучение флоккула совместно с холодным волокном; на длинных волнах (10-17см) проявляется излучение корональной аркады над волокном и само волокно.

Структура протуберанца по наблюдениям на W-на лимбе (наблюдения 4-6 октября 1996г.)

Наблюдения в центре диска (см. Рис. 27) указывают на существование двух корональных структур: это арочная структура над холодным волокном по наблюдениям в мягком рентгене по данным спутника YОНКОH (с температурой около $4 \cdot 10^6$ K), и яркие основания этой арки в линиях FeIX по данным спутника SOHO (с температурой около $12 \cdot 10^6$ K). При наблюдениях на лимбе также видны две корональные структуры: это все та же рентгеновская арка, но уже видимая сбоку (см. Рис. 28a), и протяженная структура типа стримера в линии FeIX (коронोगраф LASCO-C1, спутник SOHO) (см. Рис. 28b).

На Рис. 29 представлены радиогелиограммы обсерватории в Nobeyama за 4 и 6.10.96. Изображения повернуты на позиционный угол Солнца и соответствуют направлению сканирования по суточной параллели. На них прослеживается выход протуберанца за лимб, как яркой петли со средней температурой около $T_b = 7000$ K. Максимальная высота протуберанца над лимбом наблюдалась 4

Октября 1996 г. На гелиограмме за 06.10.96 (Рис. 29) видно полное отсутствие активности на лимбе. Наблюдения за этот день использовались нами в качестве опорных при детальном анализе структуры протуберанца на лимбе.

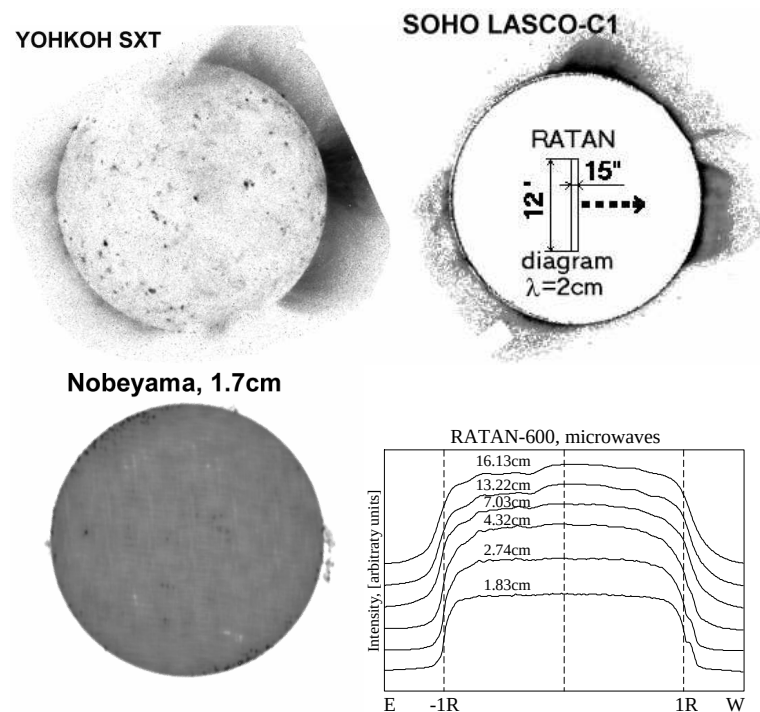
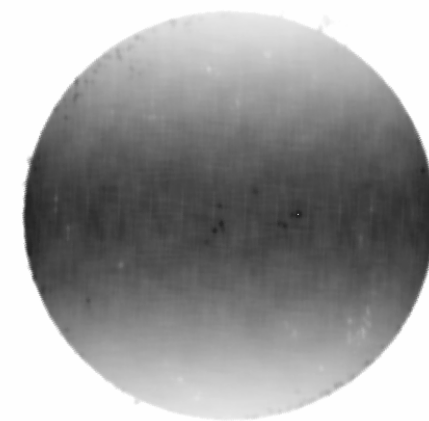
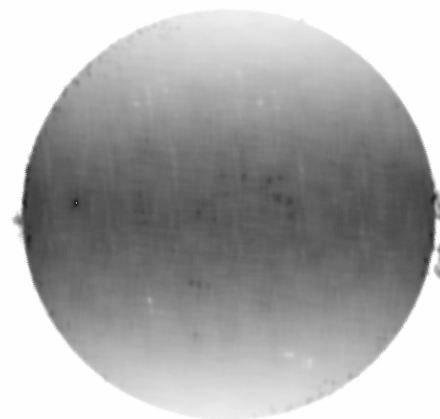


Рис. 28 Наблюдения протуберанца на западном лимбе Солнца за 4 октября 1996 года, выполненные в различных диапазонах волн. Для выделения слабоконтрастного радиоисточника на лимбе применены специальные методы.



a)



b)

Рис. 29 Наблюдения Солнца на радиогелиографе в Nobeyama на волне 1.7см за 6 октября (верхний рисунок) и 4 октября (нижний рисунок) 1996 года. 6 октября 1996 отмечалось полное отсутствие активности на западном лимбе, что было

использовано при обработке наблюдений протуберанца за 4 октября 1996 г.

Спектрально-поляризационный анализ наблюдений на РАТАН-600.

Обзор данных радионаблюдений

Многоволновые радионаблюдения на РАТАН-600 протуберанца на W- лимбе Солнца, сделанные в октябре 1996г., позволили получить спектральную информацию о радиоизлучении протуберанца в широком диапазоне волн в единовременных измерениях. Следует отметить, что до настоящего времени подобная информация отсутствовала и при разработке моделей часто использовали усредненный спектр излучения протуберанца, полученный по наблюдениям на разных инструментах и в разное время [51], [52].

Детальность, с которой регистрируются спектры радиоизлучения протуберанца, можно проследить на Рис. 30. Здесь приведены результаты наблюдений в коротковолновой части ПАС на нескольких волнах от 1.83 см до 4.32 см в интенсивности на 15 волнах. Всего же в наблюдениях участвовало 32 длины волны (от 1.83 до 17.96см) как в интенсивности, так и в круговой поляризации. На Рис. 30 на W- лимбе (справа) видна слабоконтрастная структура протуберанца на всех представленных волнах.

Для четкого выделения структуры протуберанца и увеличения динамического диапазона регистрации необходимо с высокой точностью выполнять операцию по выделению и вычитанию уровня спокойного Солнца.

На Рис. 31 показано сопоставление изображения протуберанца на W- лимбе по данным коронографа LASCO C1 спутника SOHO с радио сканами РАТАН-600 на нескольких выбранных волнах во всем диапазоне (от 1.83 см до 17.96 см). Интересно отметить, что распределение яркости в радиодиапазоне до высот $0.5 R_{\odot}$ отличается большей структурностью по сравнению с изображением в линии 5303Å коронографа LASCO C1.

SUN: Oct.04, 1996

Intensity

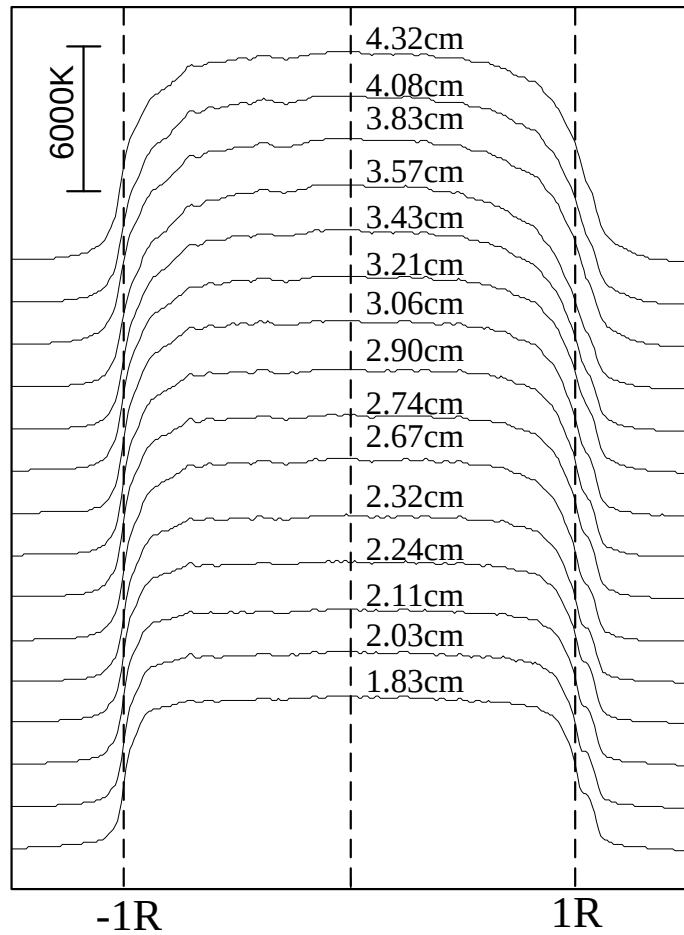
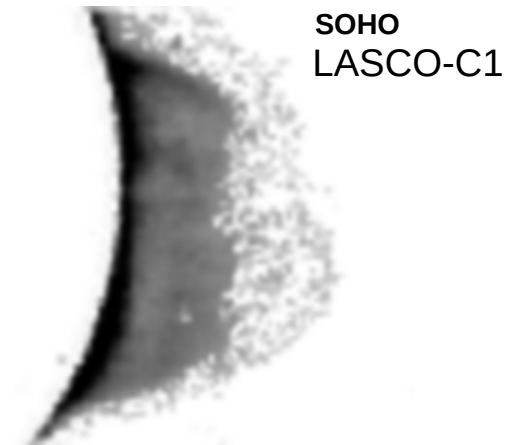


Рис. 30 Наблюдения Солнца в интенсивности в коротковолновой части диапазона ПАС на 15 волнах.



$I=I(R)+I(L)$ SUN: Oct.04, 1996 **RATAN-600**

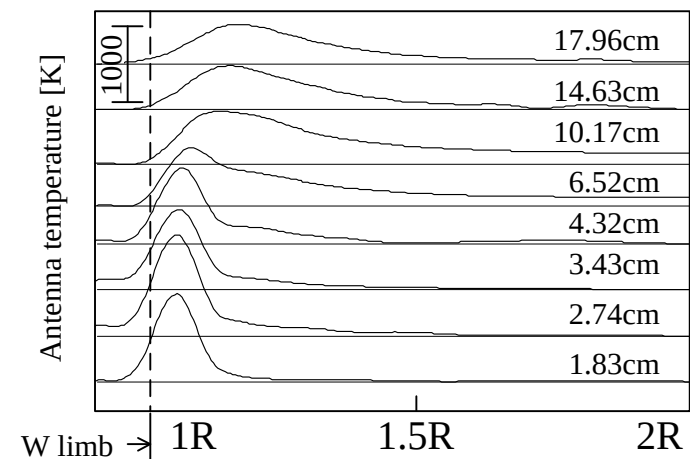


Рис. 31 Сопоставление залимбовых наблюдений протуберанца на нескольких выбранных волнах ПАС с данными коронографа LASCO-C1. Видно, что на этих высотах радиоизлучение протуберанца отличается большей структурностью по сравнению с линией 5303А

Структурный анализ области протуберанца на лимбе методом Гаусс анализа.

Хорошая стабильность параметров антенны (доли угловых секунд) и аппаратуры (стабильность инструментальных погрешностей не превышает доли процента за несколько дней) позволили достичь предельных параметров регистрации. При этом в измерениях параметра Стокса $I = I(R) + I(L)$ с целью выделения уровня спокойного Солнца реализован динамический диапазон $\approx 10^4$, а при выделении поляризованного сигнала $V = I(R) - I(L)$ с коррекцией инструментальных погрешностей достигнут уровень флуктуационной чувствительности [53], [54].

На Рис. 32 демонстрируется результат корректного учета излучения спокойного Солнца и его вычитания. Здесь в качестве опорного уровня спокойного Солнца было выбрано наблюдение за 6 октября 1996г. Согласно Рис. 29, западный лимб Солнца был полностью свободен от какой-либо активности. В результате увеличился динамический диапазон записи и излучение протуберанца хорошо выделяется на лимбе с большим соотношением сигнала к шуму. Внизу приведено для сравнения изображение протуберанца на двумерной карте радиогелиографа в Nobeyama.

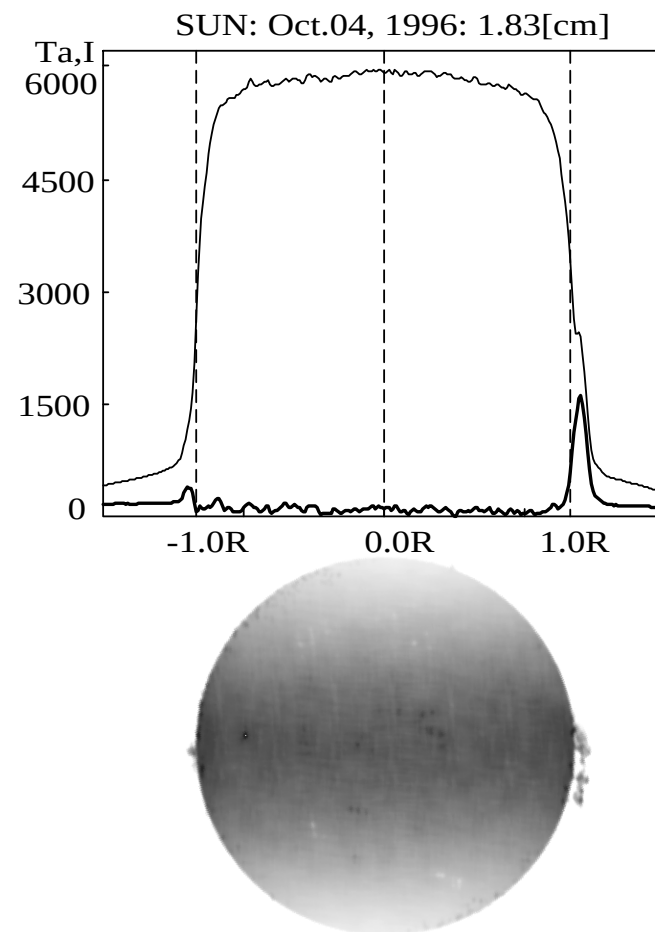


Рис. 32 Пример выделения сигнала протуберанца на лимбе Солнца (верхний рисунок). Жирной кривой показано остаточное излучение после вычитания спокойного Солнца. Внизу для сравнения приведена карта на волне 1.7 см радиогелиографа в Nobeyama.

На Рис. 33 приведены результаты наблюдений в коротковолновой части ПАС на нескольких волнах от 1.83 см до

2.74 см в интенсивности (верхний рисунок) и в круговой поляризации (нижний рисунок). Излучение спокойного Солнца в интенсивности вычтено и на западном лимбе получено изображение протуберанца на всех представленных волнах. Легко заметить, что записи Солнца в интенсивности носят шумовой, но коррелированный характер, что представляет собой пример мелкомасштабной структуры спокойного Солнца, так называемой радиогрануляции [55]. Это указывает на высокую чувствительность наблюдений. С другой стороны, записи Солнца в круговой поляризации показывают некоррелированный характер, что указывает на достижение предельной чувствительности по регистрации (т.е. до уровня собственных шумов системы). При этом на западном лимбе зарегистрировано поляризованное излучение на ряде волн (здесь и везде на записях правый знак поляризации направлен вверх, левый - вниз).

Таким образом, выполнив вычитание одномерных сканов в интенсивности за 6 октября 1996 из сканов за 4 октября 1996, мы получили профили записей протуберанца за лимбом на всех 32 частотах микроволнового диапазона. На Рис. 34 показаны образцы таких профилей на 9 выбранных частотах из этого диапазона. Как видно из приведенных графиков антенной температуры (пунктир, относительные единицы), в области излучения за лимбом хорошо заметны два пика яркости на разных высотах и протяженное гало на больших высотах.

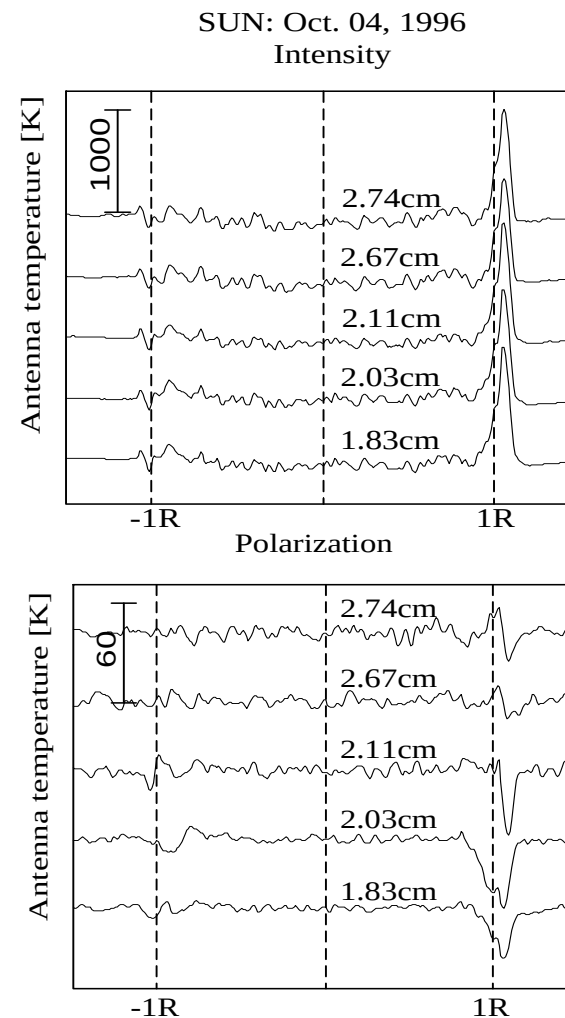


Рис. 33 Пример обработки записей на нескольких волнах в коротковолновой части ПАС в интенсивности (вверху) и круговой поляризации (внизу). В записях интенсивности вычтен сигнал спокойного Солнца. В записях поляризации проведена коррекция инструментальных поляризационных погрешностей. Максимальная величина степени круговой поляризации составила 3%.

С целью детального отождествления этих компонент каждый профиль был подвергнут гаусс - анализу путем выделения двух ведущих гауссиан и остаточного уровня излучения [56]. Результаты такого анализа также представлены на этом же рисунке. Для удобства дальнейшего изложения эти три компонента названы источниками А, В и С в порядке возрастания их высот над лимбом.

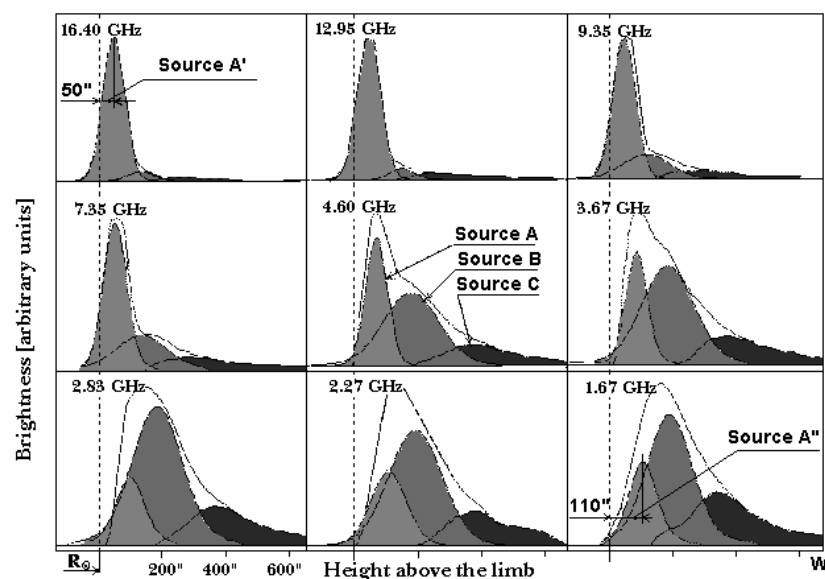


Рис. 34 Результат гаусс-анализа структуры протуберанца на лимбе в диапазоне ПАС на выбранных частотах. Четко выделяется многокомпонентная структура: холодное волокно - источник А, корональная аркада- источник В, корональный стример- источник С.

Из результатов гаусс - анализа следуют два вывода (см. Рис. 34):

1. На высоких частотах доминирует источник А, но с ростом длины волны интенсивности источников В и С относительно источника

А возрастают, и в области длинных волн (длиннее 10 см) относительные яркости всех трех источников становятся неизменными.

2. Высота источника А над лимбом меняется с длиной волны: на коротких волнах он ближе к лимбу (источник А', высота 50''), чем на длинных, и в длинноволновой области (длиннее 10 см) его высота становится неизменной при увеличении длины волны (источник А'', высота 110'').

Эти закономерности могут быть объяснены тем, что мы имеем два типа источников с различными режимами формирования излучения с тормозным механизмом: оптически толстые и оптически тонкие источники.

Действительно, профили записей антенной температуры T_A пропорциональны профилям распределения яркостной температуры излучения T_B источника. При наблюдениях с ножевой диаграммой, большая полуось которой больше вертикального размера источника $\Omega_{\text{vert}} > \theta_y$, эта связь дается уравнением

$$T_A(x) = T_B(x) \cdot (\theta_y / \Omega_{\text{vert}}), \quad (4.1)$$

при условии, что горизонтальная диаграмма уже горизонтального размера источника.

Для оптически толстого источника имеем для яркостной температуры T_B и плотности потока S соотношения

$$T_B = \text{const}, \quad S_{\text{thick}} = k \cdot T_B / \lambda^2, \quad (4.2)$$

тогда как для оптически тонкого источника следует

$$T_B = k \cdot \lambda^2, \quad S_{\text{thin}} = \text{const}. \quad (4.3)$$

Таким образом, в профилях записей на высоких частотах доминируют оптически толстые (холодные) источники, а на низких частотах доминируют оптически тонкие (горячие) источники. Это

полностью объясняет наблюдаемые формы профилей залимбовых источников в следующих предположениях:

- источники В и С являются оптически тонкими на всех рассматриваемых частотах,
- источник А является тесной парой (ниже углового разрешения) из двух компонент: оптически толстой компоненты (А'), располагающейся ближе к лимбу, и оптически тонкой компоненты (А''), находящейся непосредственно над ним по высоте. Так как мы регистрируем только суммарное распределение яркости от обеих компонент, его центр тяжести перемещается в область более высоких высот над лимбом с ростом длины волны.

Количественный анализ наблюдений

Абсолютная калибровка потоков и температур радиоисточников

С использованием полных профилей залимбовых записей и их разделения на компоненты (см. Рис. 34) были определены абсолютные величины потока радиоизлучения, как суммарные, так и для отдельных источников А, В и С. При калибровке использовались абсолютные плотности потока радиоизлучения спокойного Солнца (сводки обсерватории Toyakawa, Japan), отнесенные к полной площади радиоскана на каждой частоте. Результаты таких расчетов показаны на Рис. 35 в виде спектров потоков для всех наблюдаемых компонент. Представленные результаты подтверждают гипотезу о различной природе излучения

источника А, В и С. Поток излучения источника А падает с ростом длины волны как λ^{-2} в коротковолновой области (на частотах выше 4.60 ГГц) в соответствии с уравнением 4.2 и выходит на постоянный уровень (около 0.2 с.е.п.) в длинноволновой области. Потоки источников В и С остаются постоянными 0.4 и 0.2 с.е.п. (соответственно) на всех частотах.

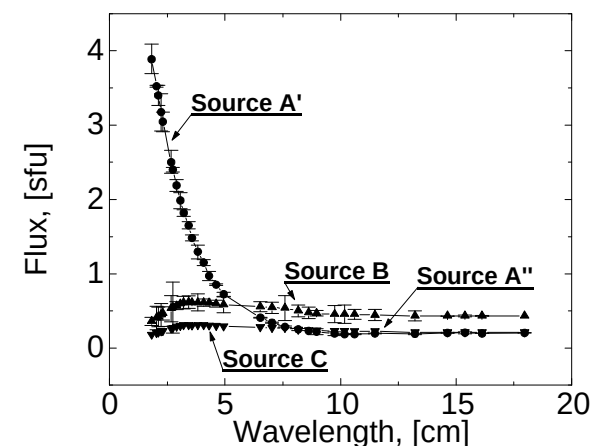


Рис. 35 Спектр потоков радиоизлучения отдельных компонент протуберанца за 4 октября 1996г.

Отождествление радиоисточников и их физические параметры

Комбинируя результаты наблюдений на диске и лимбе, можно отождествить каждый источник радиоизлучения на лимбе с оптическим и частично восстановить трехмерную структуру протуберанца и окружающих его корональных структур.

На Рис. 36 представлены спектры яркостных температур для всех радио источников активной области. В этих расчетах горизонтальный размер источника определялся из записей

регистрации (см., например, Рис. 34), в качестве вертикального размера был взят размер из данных наблюдений по картам УОНКОН и радиогелиографа в Nobeyama (Рис. 29, Рис. 32).

В нижеприведенной таблице представлен перечень параметров многокомпонентной структуры протуберанца по наблюдениям на западном лимбе для 4 октября 1996г

Параметр	Тип источника			
	A'	A''	B	C
Высота над лимбом (ЦТ) [угл.сек]	50	110	210	>250
Ширина источника [угл.сек]	70	40	200	>200
Поток радиоизлучения [с.е.п.]	-	-	0.4	0.2
Яркостная температура [град]	10 ⁴	-	-	-

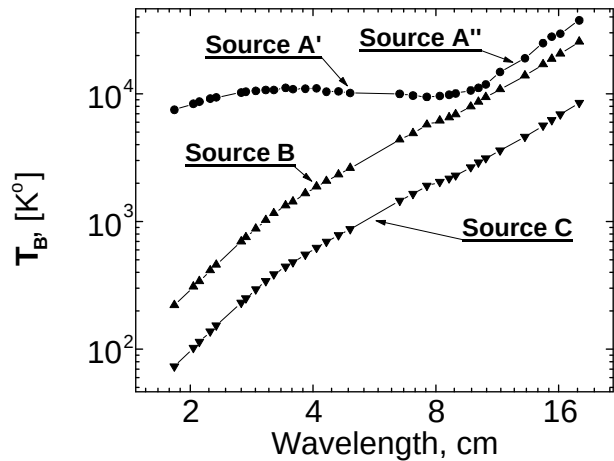


Рис. 36 Спектр яркостных температур протуберанца по наблюдениям 4 октября 1996г.

Холодное волокно (источник A')

Источник A', присутствовавший на W-лимбе 4 октября 1996г., был однозначно отождествлен с холодным волокном, которое наблюдалось в линии H α в центре диска 25 сентября 1996г. На картах радиогелиографа Nobeyama на частоте 17 ГГц яркость волокна в центре диска и на лимбе была одинакова и составляла около 7000 К. По наблюдениям на РАТАН-600 температура этого источника на лимбе быстро повышалась с ростом длины волны до 10000 К и оставалась постоянной на этом уровне в длинноволновой области спектра (см. Рис. 36). При интерпретации спектра волокна следует учитывать, что холодное вещество волокна имеет собственную температуру порядка 4000 - 6000 К, согласно многочисленным оптическим измерениям [57] с большой скважностью и высокой непрозрачностью отдельных волокон-нитей. С учетом этого, наблюдаемый спектр радиояркости указывает на существование в волокне также "теплой" компоненты с температурой около 10000 К, меру эмиссии которой можно определить по точке перехода от оптически тонкого к оптически толстому режиму излучения вблизи волны 3 см (см. Рис. 36). Результаты моделирования в этих предположениях показывают, что наблюдаемый спектр радиояркости удовлетворительно воспроизводится следующей двух- компонентной моделью

$$T_{B_A} = Q_{fill} T_{cold} e^{-\tau_0} + T_0 (1 - e^{-\tau_0}), \tag{4.4}$$

$$\tau_0 = \lambda^2 / \lambda_0^2 = 2 \cdot 10^{-22} N_0^2 T_0^{-3/2} \lambda^2 L_0, \tag{4.5}$$

где $Q_{fill}=0.4$ коэффициент заполнения (филлинг-фактор) в картинной плоскости, $T_{cold} = 6000$ К- температура холодных нитей, $\lambda_o = 2.0$ см - критическая длина волны для тормозного излучения теплого вещества с $T_o = 10000$ К. Параметр λ_o позволяет оценить "column emission measure" $EM_o = N_o^2 L_o$ разреженной компоненты.

$$EM_o = 5 \cdot 10^{21} T_o^{3/2} / \lambda_o^2, \quad (4.6)$$

откуда можно определить $EM_o = 2 \cdot 10^{25} \text{ cm}^{-5}$. Для оценки значения электронной концентрации этой компоненты в качестве грубой оценки характерного размера толщины L_o волокна примем его наблюдаемую протяженность по высоте : $L_o = 10'' = 7 \cdot 10^8 \text{ cm}$, что дает оценку $N_o = 5 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-3}$. Эти значения указывают на сильную разреженность диффузной плазмы.

Горячие компоненты (источники А", В, С).

Для оптически тонких источников излучения основным измеряемым параметром области излучения является "корональный параметр" $\langle tcTc \rangle$, определяющий среднюю яркость области излучения

$$\langle Tb \rangle = \langle tc Tc \rangle \lambda^2, \langle tcTc \rangle = \int I_e(t) dt, \quad (4.7)$$

где $dt = d\pi\lambda^2$ - радиотолща, отнесенная к $\lambda = 1 \text{ cm}$ [58]. Значение коронального параметра определяет меру эмиссии как

$$EM = 5 \cdot 10^{21} \langle tc Tc \rangle Tc^{0.5} \quad (4.8)$$

Исходя из спектров яркостных температур (см. Рис. 36) можно оценить параметр $\langle tcTc \rangle$ для каждого из источников(А",В,С), как $\langle tcTc \rangle = \langle Tb/\lambda^2 \rangle$.

$$\langle tcTc \rangle_{A''} = 120, \langle tcTc \rangle_B = 90, \langle tcTc \rangle_C = 30$$

Для сравнения, в работе [58] были получены оценки этого параметра для спокойного Солнца, флоккулярной площадки и корональной дыры: $\langle tcTc \rangle = 110, 90$ и 60 соответственно.

На основании полученных значений параметра $\langle tcTc \rangle$ можно оценить значение EM для каждого источника

$$EM_{A''} = 6 \cdot 10^{26}, EM_B = 4.5 \cdot 10^{26}, EM_C = 1.5 \cdot 10^{26}$$

Сопоставляя характерные размеры и высоты формирования оптических структур с высотами формирования залимбовых микроволновых источников, мы можем отождествить источник В с рентгеновской аркой, а источник С со стримером. Горячая компонента А" источника А не имеет оптического аналога ни на лимбе, ни в центре диска. Этот источник соответствует, по-видимому, области постоянного энерговыделения в месте контакта двух систем магнитных полей - волокна и рентгеновской арки; однако, без оптического отождествления мы не можем оценить яркостную и электронную температуру этой области. Возможно, что это имеет прямое отношение к РСТР волокна, относительно которого существуют противоречивые представления [51], [57], [59].

Поляризационные измерения

Инструментальные особенности измерения круговой поляризации на радиотелескопе РАТАН-600

Модернизированный скалярный облучатель, используемый при наблюдениях Солнца на РАТАН, в сочетании с перископической системой зеркал обеспечивает очень низкий уровень паразитной круговой поляризации в см диапазоне волн (порядка 1-3% от антенной температуры Солнца). Высокая флуктуационная чувствительность инструмента (порядка 0.01%) и стабильность параметров всей системы, благодаря использованию пассажного режима наблюдений, позволяют дополнительно проводить инструментальную коррекцию поляризационных наблюдений. Использование метода коррекции по вычитанию паразитной поляризации по наблюдениям за несколько близких дней позволяет снизить эффективный уровень паразитной поляризации до уровня 0.1-0.05%, что открывает возможность регистрации очень слабых магнитных полей, включая протуберанцы.

Следует отметить, что качество измерений в спектре поляризации V в значительной степени определяется параметрами входного совмещенного облучателя [17]. Существуют несколько типов поляризационных искажений инструментального характера:

1-й тип погрешностей представляет собой собственно кросс - поляризационные ошибки, возникающие из-за искажений в антенной системе Южного сектора с Перископом и приемного зеркала (Облучателя), выполненного в виде несимметричного параболического цилиндра. Величина этих ошибок составляет 0.5-1%, но они носят стабильный характер и их можно отнести к систематическим ошибкам, что позволяет учесть при обработке.

2-й тип погрешностей возникает при несимметричном облучении антенной системы на многих волнах с помощью сложного многоволнового совмещенного рупора как по правой R , так и по левой L круговым поляризациям. При этом диаграммы на каждой из двух поляризаций смещены в пространстве на величину $\pm 0.1\lambda/D_{x,y}$, где x и y - горизонтальная и вертикальная оси диаграмм соответственно. Такое смещение диаграмм в горизонтальной и вертикальной плоскостях также носит относительно стабильный характер (измеренные отклонения за год не превышают самой величины). При этом на интервалах времени 2-3 недели эти изменения практически отсутствуют.

Такая высокая стабильность антенных и аппаратурных параметров позволяет реализовать различные методы учета этих инструментальных характеристик.

Учет всех вышеупомянутых систематических погрешностей позволил реализовать предельные точности по измерению степени круговой поляризации на отдельных волнах, вплоть до 0.02% на диске Солнца [60], [61] (см. Рис. 37).

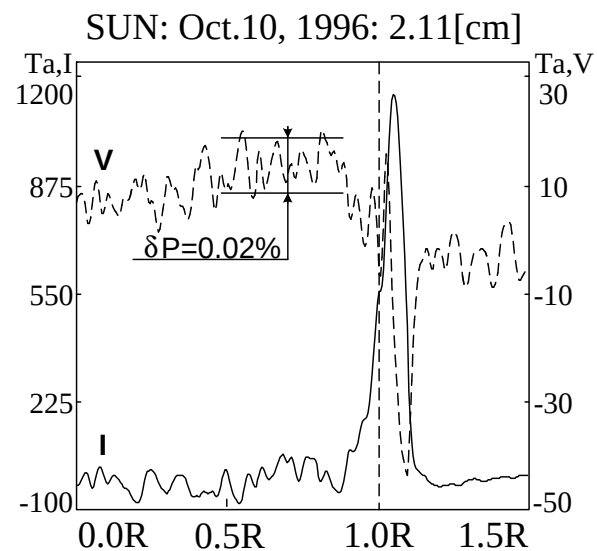


Рис. 37 Пример записи интенсивности и круговой поляризации на волне 2.11 см с коррекцией инструментальных погрешностей. Видно, что максимум излучения в поляризации смещен вверх по сравнению с максимумом интенсивности излучения волокна.

На Рис. 38 а) и б) представлены наблюдения Солнца на волне 1.83 см. На верхнем рисунке приведены записи в интенсивности и круговой поляризации в одном масштабе. Они показывают, что величина инструментальных поляризационных искажений, проявляющихся на лимбах, не превышает 1%. На нижнем рисунке масштаб в каналах круговой поляризации увеличен в 40 раз, в результате чего вид инструментальных искажений увеличен (в интенсивности масштаб сохранен без изменений). Видна высокая стабильность инструментальных искажений на протяжении трех дней. По нашим исследованиям, эта стабильность часто сохраняется до периодов в 2-3 недели и связана, в основном, с качеством установки главного отражателя и приемного зеркала. Учет

указанных выше инструментальных искажений был выполнен на программном уровне и используется при обработке в регулярных наблюдениях.

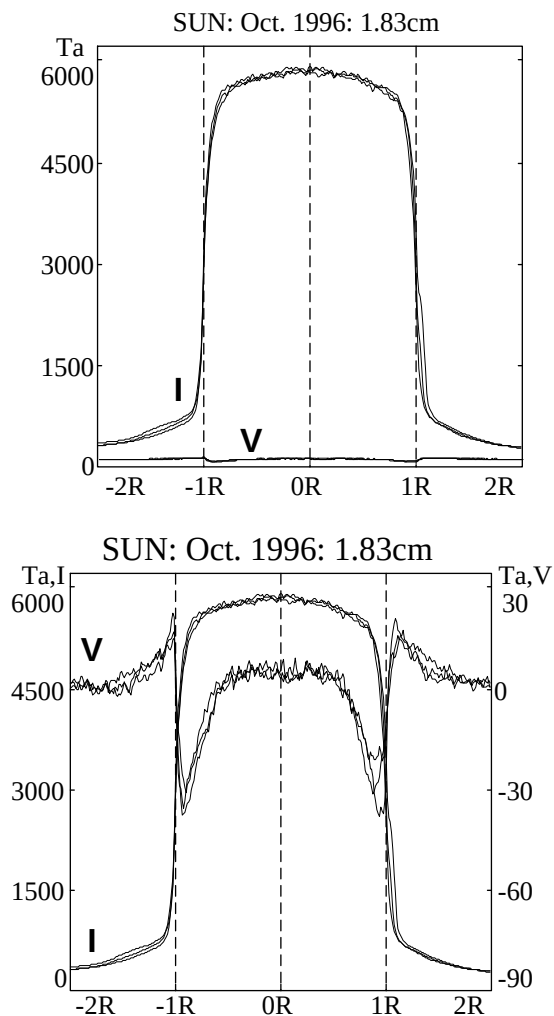


Рис. 38 Пример записей в интенсивности и круговой поляризации, которые показывают временную стабильность инструментальных поляризационных искажений (за несколько дней). На верхнем рисунке интенсивность и поляризация приведены в одном масштабе. Внизу то же, но масштаб в канале

поляризации увеличен в 40 раз. Сигнал величиной 0.5% сохраняет стабильность с высокой точностью.

Результаты наблюдения поляризации протуберанца на лимбе 4 октября 1996 года

Оптические измерения магнитных полей (по эффектам Зеемана и Ханле) приводят к значениям порядка 10 Гс в плотных жгутах, однако в работе [100] показано, что напряженность поля в активных протуберанцах может достигать 100 Гс. Направление вектора поля почти параллельно оси волокна, с систематическим отклонением на 10° - 15° . Радиоизмерения магнитных полей в протуберанцах немногочисленны [62] и приводят к систематически меньшим значениям в несколько гаусс. Эти измерения основаны на возникновении круговой поляризации тормозного радиоизлучения, пропорциональной напряженности магнитного поля:

$$\rho = (T_R - T_L) / (T_R + T_L) = 2 \frac{v_B}{v} \cos \alpha, \quad v_B [H] = 2.8 \cdot 10^6 B [G], \quad (4.9)$$

где α - угол наблюдения относительно магнитного поля. Это выражение справедливо для оптически тонкого однородного слоя плазмы. В работах [63], [64] Г.Б. Гельфрейхом получена обобщенная формула, связывающая напряженность магнитного поля H [Гс] с измеряемыми характеристиками радиоизлучения: степенью поляризации p [%], наклоном спектра n и длиной волны λ [см]:

$$H = \frac{107 p}{n \lambda}. \quad (4.10)$$

Применение этой формулы к наблюдательным данным позволило определить величину магнитного поля $H = 50 \pm 5$ [Гс] в протуберанце. Следует отметить место локализации области поляризованного излучения относительно центра тяжести волокна.

Максимум поляризованного излучения смещен относительно лимба на 82", тогда как волокно расположено на высоте 43" и имеет ширину порядка 70" (см Рис. 37). Таким образом, область поляризации находится выше волокна, на границе контакта волокна и корональной аркады.

Для оценки достоверности измерения величины поляризованного излучения эти измерения были повторены, с использованием в качестве опорного дня наблюдения за 1.10.96. Хотя в этот день уровень активности был выше, чем для 6.10.96, он оставался на очень низком уровне, поэтому запись поляризации около западного лимба также давала хорошую оценку чисто инструментального сигнала. Результаты этой контрольной проверки находятся в хорошем соответствии со сделанными выше оценками поляризованного сигнала протуберанца как по его величине, так и по локализации над лимбом.

Дискуссия

В теории протуберанцев ключевой проблемой является поиск физических механизмов формирования и поддержания жгутов холодной плазмы в окружении горячей корональной плазмы над линией раздела крупномасштабных магнитных полей на уровне фотосферы.

В настоящей работе получены новые результаты в этой области, так как впервые удалось выделить все характерные структуры не на самом солнечном диске, а на его краю, с получением реальной высотной стратификации всех структур (см. Рис. 39).

Существующие представления в этой области сводятся к тому, что термоизоляция волокон от короны обеспечивается собственным продольным магнитным полем волокна (эффект уменьшения теплопроводности поперек сильных магнитных полей), поэтому вокруг волокна образуется тонкий слой PCTR, который слабее, чем в случае спокойного Солнца, и поэтому интегральная яркость над волокном меньше, чем для спокойного Солнца, что и приводит к наблюдаемому эффекту депрессии радиояркости над волокном. Другое возможное объяснение депрессии радиояркости над волокнами - это дефицит вещества не в PCTR, а в самой короне над волокном. Наблюдения в УФ на SKYLAB подтверждают такую интерпретацию, однако детальный анализ радиоспектров приводит к оценкам меры эмиссии PCTR, которые на порядок меньше УФ оценок [51]. Для преодоления этой трудности были выдвинуты много - жгутовые модели с PCTR вокруг каждого жгута, а не всего волокна в целом.

Одним из основных результатов настоящей работы является заключение о том, что в области локализации холодного волокна (источник A' по наблюдениям ПАТАН-600) вообще нет измеримых количеств вещества в области PCTR температур. Это заключение следует из того, что ближайший горячий источник (источник A'') локализован на 50 угл сек выше источника A'. В то же время сам источник A' содержит только вещество с характерными температурами 6000 - 10000 К и не содержит горячего вещества с температурами $T > 20000$ К. Этот вывод следует из анализа наблюдаемых профилей яркости залимбовых источников. Как было показано выше, если в источнике есть горячее, оптически тонкое вещество, то его яркость растет, как квадрат длины волны. Поэтому

на длинных волнах относительные яркости всех горячих источников сохраняют постоянные значения. Именно это мы и наблюдаем для источников A'', B и C в пределах экспериментальных погрешностей. В то же время относительная яркость источника A' на длинных волнах быстро падает до неизмеримо-малых значений. Это и означает, что его яркость постоянна, то есть он не содержит горячего вещества.

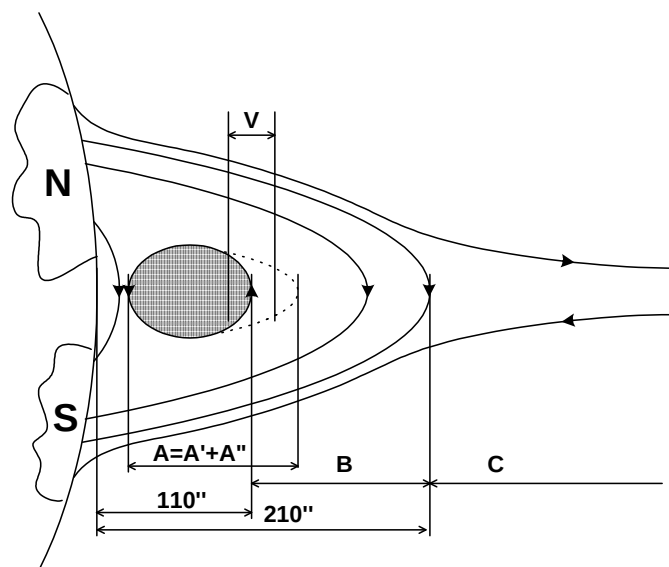


Рис. 39 Модельное представление структуры протуберанца по многоволновым радионаблюдениям на РАТАН-600. Здесь: A' - оптически толстое излучение волокна, состоящего из нитей с температурой 7000 K, погруженных в теплую среду с температурой 10000 K ; A''- обнаруженный источник оптически тонкого излучения, смещенный на 50'' вверх относительно A'; B-оптически тонкое излучение корональной аркады; C-оптически тонкое излучение стримера. Поляризованное излучение V (зарегистрированное на коротких волнах) расположено между источниками A' и A''.

Второй результат связан с возможной природой источника A'' как области длительного энерговыделения из-за пересоединения магнитных полей над волокном. Существование такой области неоднократно предсказывалось, однако прямых подтверждений этому получено не было.

Третий результат связан с возможностью новой интерпретации проблемы депрессии радиояркости над волокнами на диске Солнца. Согласно нашим измерениям, вклад PCTR в наблюдаемую радиояркость над волокном практически отсутствует, а радиотолща короны над волокном несколько ниже, чем для спокойного Солнца. Соответствующий корональный параметр $\langle tcTc \rangle$ для спокойного Солнца имеет значение порядка 90 [58], тогда как для источников A''+B+C на лимбе $\langle tcTc \rangle = 120+90+30=240$. Так как наблюдения на лимбе соответствуют оценкам вдоль слоя, а наблюдения на диске - поперек слоя, то суммарная радиотолща горячих источников на диске над волокном может быть вдвое меньше, чем на лимбе.

Таким образом, можно ожидать, по данным наблюдений на лимбе, что при наблюдениях волокна на диске его радиояркость на диске должна быть соизмерима или несколько выше, чем для уровня спокойного Солнца на этих частотах. Наблюдения РАТАН-600 за 25 сентября (см Рис. 27) подтверждают этот вывод. С другой стороны известно, что радиояркость флоккулярных площадок значительно превышает радиояркость спокойного Солнца. Таким образом, в длинноволновой части спектра фактически мы имеем депрессию радиояркости над волокном только относительно прилегающих флоккулярных площадок, а не относительно уровня спокойного Солнца.

В коротковолновой части радиоспектра доминирует холодное волокно (источник А'), радиояркость которого ниже уровня спокойного Солнца и флоккулов, поэтому в этой области частот существует истинная депрессия радиояркости, в соответствие с многочисленными наблюдениями волокон на радиогелиографе Нобеяма на частоте 17 ГГц.

Наши результаты многочастотных наблюдений протуберанцев на лимбе Солнца показывают необходимость существенного пересмотра ряда традиционных представлений о механизмах формирования и энергетике этих структур.

Выводы

Впервые получен многочастотный спектр радиоизлучения протуберанца в диапазоне 2-16 ГГц в единовременных наблюдениях.

Обнаружена многокомпонентная структура протуберанца и проведено отождествление всех основных компонент протуберанца (волокон, корональной аркады и стримера) с оценкой их физических параметров.

Обнаружен новый тип радиоисточника, расположенного на границе волокна и корональной аркады. Характеристики этого источника соответствуют ожидаемой области длительного аномального энерговыделения в области пересоединения полей во внешней части волокна и внутренней области корональной аркады, в соответствии с гипотезой об устойчивых типах спиральности волокон.

Заключение

Создание и внедрение в регулярную эксплуатацию наблюдательного комплекса ПАС на радиотелескопе РАТАН-600 для наблюдений радиоизлучения Солнца требовало создания адекватного программного обеспечения для компьютерной обработки многоканальных данных. Такой программный комплекс был создан автором и используется в эксплуатации в течение двух лет. Это позволило реализовать регулярную передачу данных наблюдений стороннему пользователю по сетям Internet.

Обработка многочастотных поляризационных данных, получаемых на данном наблюдательном комплексе на РАТАН-600, и сопоставление их с наблюдениями на других обсерваториях мира (VLA, Nobeyama) позволили проанализировать ряд активных образований в атмосфере Солнца.

На основании этих данных впервые получены статистические зависимости напряженности магнитного поля в активных областях, в которых наблюдались шумовые бури и без них. Замечено, что появлению шумовой бури предшествует спад напряженности магнитного поля в данной активной области, и усиление напряженности поля приводит к прекращению шумовой бури. Данные исследования позволили развить концепцию магнитосферы активной области Солнца.

Обнаружен ряд особенностей радиоизлучения активных областей, связанных с шумовыми бурями. Эти особенности проявляются в спектрах источников и в их развитии, в частности, в многократной смене знака круговой поляризации и в узкополосных пиках поляризованного потока в АО с шумовыми бурями.

Впервые получен многочастотный спектр радиоизлучения протуберанца в диапазоне 2-16 ГГц в единовременных наблюдениях, и обнаружена его сложная многокомпонентная структура. Проведенное отождествление с оптическими и рентгеновскими наблюдениями позволило оценить параметры таких структур, как волокна, корональные аркады и стримеры, а также обнаружить радиоисточник нового типа.

Основные результаты работы:

1. Разработан и внедрен комплекс программ обработки многочастотных наблюдений Солнца на РАТАН-600.
2. Разработана и внедрена методика учета инструментальных погрешностей при измерении предельной степени поляризации (0.3% на лимбе и 0.05% на диске Солнца).
3. На основе программно-методических разработок автора проведен ряд исследований тонкой структуры поляризации в АО в атмосфере Солнца:
 - а) получена статистическая зависимость напряженности магнитного поля в активных областях, связанных с наличием или отсутствием шумовых бурь.
 - б) обнаружены тонкие спектральные структуры круговой поляризации микроволнового излучения, связанные с шумовыми бурями.
4. В радиодиапазоне по многоволновым наблюдениям на лимбе обнаружена многокомпонентная высотная структура протуберанца. В результате проведенного отождествления структуры протуберанца и реализации высоких координатных и поляризационных точностей измерены параметры волокна, корональной аркады и стримера.

Обнаружен новый тип радиоисточника на границе волокна и корональной аркады, не имеющий аналога в других диапазонах. Характеристики этого источника соответствуют области длительного аномального энергосвечения в области пересоединения магнитных полей во внешней части волокна и внутренней области корональной аркады.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор благодарит сотрудников коллектива групп радиоизлучения Солнца САО и ГАО РАН, руководимых Степановым А.В., Богодом В.М., Коржавиным А.Н. Особую признательность автор выражает руководителю работы Богоду В.М., а также Гребинскому А.С. за большую помощь во время выполнения работы.

Литература

1. Korolkov D.V., Parijskij Yu.N.: The Soviet RATAN-600 Radio Telescope, Sky&Telescope, 57, No.4, 1979, p.324.
2. Богод В.М., Болдырев С.И., Ипатова И.А., Корольков Д.В., Романцов В.В. : Комплекс радиополяриметров сантиметрового диапазона для радиотелескопа РАТАН-600. Солнечные Данные. N 11, 1976.
3. Посошенко Л.З., Игнатов Б.Г., Тимофеев В.А., Тихомиров Н.А.: Многоканальное устройство автоматической регистрации информации для радиометров СВЧ, Вторая Всесоюзная школа-семинар. Тезисы докладов. Ереван, 1974, с.181.
4. Богод В.М., Гельфрейх Г.Б., Петров З.Е.: Автоматизированный солнечный спектрально-поляризационный комплекс ИКАР-16 на

- радиотелескопе РАТАН-600. Астрофиз. Исслед. (Изв. САО), 1983, 17, с.124.
5. Андрианов С.А., Бурлаков Б.Е.: Методика автоматизированного анализа сканов солнечного радиоизлучения, XVI Всесоюзная конференция по радиоастрономическим исследованиям солнечной системы. (Звенигород, октябрь 1984 г.), Тезисы докладов. Москва, с.83, 1984.
 6. Богод В.М., Петров З.Е., Шатилов В.А. : Расширенный солнечный комплекс ИКАР-24. Всесоюзная конференция по радиоастрономической аппаратуре: Тезисы докладов. Ереван, 1985, с.227.
 7. Шатилов В.А. : Оперативное представление астрофизических результатов наблюдений Солнца на РАТАН-600, Астрофиз. Исслед. (Изв. САО), 1987, **25**, с.168.
 8. Zheleznyakov V.V., Zlotnik E.Ya. : Radio Physics of the SUN, Kundu and Gergely (edu), p.87, 1980.
 9. Богод В.М., Ватрушин С.М., Абрамов-Максимов В.Е., Дикий В.Н., Цветков С.В. : Панорамный радиометрический анализатор спектра диапазона 3.5ГГц-18ГГц с цифровой обработкой информации. - препринт САО N 84П, 1993.
 10. Богод В.М., Комар Н.П. : Применение схемы линейного интегратора со сбросом в быстродействующих многоканальных анализаторах спектра. Препринт 85, 1992, САО РАН, Нижний Архыз, с.1-14.
 11. Миллер В.Г., Полухин В.С., Путилов В.А.: Система сбора и обработки информации солнечного радиоинтерферометра. - В кн.: Исследования по геомагнетизму, аэронамии и физике Солнца. М.: Наука, 1977, вып. 42, с. 182.

12. Enome S., Nakajima H.: New Nobeyama Radioheliograph in operation. STEP GBRSC News, Nagoya Univ., Toyokava. Vol. 2, No 2, p.16.
13. Gary D.E., Hurford G.J., Flees D.J.: First Interferometric Observation of Solar Microwave Millisecond Spike Bursts, Astroph.J., 1991, 369, N 1, pt.1, p. 255.
14. Смольков Г.Я., Криссинел Б.Б., Тресков Т.А., Потапов Н.Н., Миллер В.Г.: Сибирский солнечный радиотелескоп. Исследования по геомагнетизму, аэронамии и физике Солнца, М.: Наука, 1990, вып. 91, с. 146.
15. Stahli M., Fuhrer M.: Digital multichannel spectrometer for solar microwave observations. Solar Phys., 1987, **114**, p. 105.
16. Lang K.R., Willson R.F., Kile J.N., Lemen J., Strong K.T., Bogod V.M., Gelfreikh G.B., Ryabov B.I., Hafizov S.R., Abramov-Maximov V.E., Tsvetkov S.V. : Magnetospheres of solar active regions inferred from spectral-polarization observations with high spatial resolution., 1993, Aph. J., **419**, 398.
17. Dikiy V.: Telecommunication Capability of Traveling Wave Resonator Antennas. Proceedings 1995 IEEE Asia-Pacific Workshop on Mobile Telecommunication. December 1-2, 1995 Kyongju, Korea.
18. Хайкин С.Е., Кайдановский Н.Л., Парийский Ю.Н., Есепкина Н.А.: 1972, Известия ГАО, **188**, с.3.
19. Borovik V.N. : Quiet Sun from Multifrequency Radio Observations on RATAN-600.: Proceedings of Seventh European Meeting on Solar Physics. Lectures Notes in Physics., 1994, **432**, 185.
20. Shergin V.S., Verkhodanov O.V., Chernenkov V.N., Erukhimov B.L., Gorokhov V.L.: Non-parametric algorithms in data reduction at RATAN-600. In "Astronomical Data Analysis Software and Systems

- VI", eds. G.Hunt & H.E.Payne. ASP Conference Series, 1997, **125**, 182.
- 21.Иванов Л.Н.: Алгоритм оптимального автоматического гаусс-анализа наблюдательных данных. Астрофиз. Исслед. (Изв. CAO), **116**, с.213, 1979.
- 22.Ахмедов Ш.Б., Богод В.М., Боровик В.Н., Вильсон Р.Ф., Гельфрейх Г.Б., Дикий В.Н., Коржавин А.Н., Ланг К.Р., Петров З.Е.: Структура активных областей на Солнце по наблюдениям на VLA и ПАТАН-600 в июле 1982г. - Астрофиз. Исслед. (Изв. CAO), 1987, **25**, с.105.
- 23.Bogod, V.M., Gelfreikh, G.B., Willson, R.F., Lang, K.R., Shatilov, V., Tsvetkov, .V.: 1992, *Solar Phys.*, **141**, 303.
- 24.Chernov, G.P.: Some features of the formation of filaments in Type IV radio bursts. *Soviet Astr.* **34**, p. 66, 1990.
- 25.Wilson R.F., Kile J.N., Lang K.R., Donaldson S., Bogod V.M., Gelfreikh G.B., Ryabov B.I., Hafisov S.R. Large Scale Coronal Magnetic Fields: Noise Storms, Soft X-rays and Inversion of Radio Polarization. *Adv.Space Res.*, v.17, No 4/5, p.265, 1996.
- 26.Братова Т.А., Гельфрейх Г.Б., Гнездилов А.А.: О связи локальных источников сантиметрового радиоизлучения Солнца с шумовыми бурями по наблюдениям на ПАТАН-600, Письма в астрономический журнал, 1983, **9**, с.495.
- 27.Гельфрейх Г.Б., Ахмедов Ш.Б., Боровик В.Н., Гольнев В.Я., Коржавин А.Н., Нагнибеда В.Г., Петерова Н.Г.: Исследование локальных источников радиоизлучения Солнца в сантиметровом диапазоне. Изв. ГАО, 1970, **185**, с.167.
- 28.Solar-Geophysical Data, 1993, **587**, pt.s.
- 29.Солнечные Данные, 1992, No 5 1993, No 5,8.

- 30.Akhmedov Sh. B. et al.: 1982, *S.Ph.*, **79**, 41.
- 31.Brosius J.W., Willson R.F., Holman G.D., Schmelz J.T.: 1992, *Ap. J.*, **386**, 347.
- 32.Gelfreikh G.B., Lubyshev B.I.: 1979, *Astron.Zh*, **56**, 562.
- 33.Lang K.R., Willson R.F.: 1987, *Ap. J.*, **319**, 514.
- 34.Raulin J.P., Willson R.F., Kerdraon A., Klein K.-L., Lang K.R., Trottet G.: 1991, *Astron. Ap.*, **251**, 298.
- 35.Mercier C., Elgaroy O., Tlamicha A., Zlobec P.: 1984, *Solar Phys*, **92**, 375.
- 36.Stewart R.T., Brueckner G.E., and Dere K.P.: 1986 *Solar Phys.* **106**, 107.
- 37.Akhmedov Sh. B. et al.: 1986, *Ap. J.*, **301**, 460.
- 38.Ахмедов Ш.Б., Богод В.М., Боровик В.Н., Вильсон Р.Ф., Гельфрейх Г.Б., Дикий В.Н., Коржавин А.Н., Ланг К.Р., Петров З.Е.: Структура активных областей на Солнце по наблюдениям на VLA и ПАТАН-600 в июле 1982г. Часть I: AR 3804. Астрофиз. исслед. (Изв. CAO), 1987, **25**, с.105.
- 39.Gelfreikh G.B. Solar radio emission at centimeter wavelengths. Proceedings of the Workshop on the Solar Electromagnetic Radiation Study for Solar Cycle 22 (SOLERS22), 3-7 June, 1991, Boulder, Co, USA. Ed. Richard F. Donnelly, Space Environment Laboratory, NOAA ERL, USA, July 1992, p.196.
- 40.Willson R.F., Lang K.R., Liggett M.: 1990 *Ap. J.*, **350**, 856.
- 41.Гельфрейх Г.Б.: Исследование магнитосфер активных областей Солнца на ПАТАН-600. Известия академии наук. Серия физическая. **59**, с.90, 1997.
- 42.Железняков В.В., Злотник Е.Я.; Астрономический журнал, **40**, с.633, 1963.

43. Железняков В.В.: Излучение в астрофизической плазме. Москва, «Янус-К», 1997.
44. Zheleznyakov V.V.: Radio Emission of the Sun and Planets. Pergamon Press Ltd. Oxford. 1970.
45. Cohen M.H.; Astrophys. J., **131**, p.664, 1960.
46. Willson R.F., Kile J.N., Rothberg B.S.: Sol. Phys., **170**, p.299, 1997.
47. Bogod V.M., Gariamov V.I., Gelfreikh G.B., Willson R.F., Kile J.N., Lang K.R.: Microwave Spectral-Polarization Structure of Type I Noise Storm-Producing Active Regions on the Sun, 1997.
48. Sakurai T.: Computational modeling of magnetic fields in solar active regions. Space Science Reviews, **51**, p. 11, 1989.
49. Gopalswamy N., Zheleznyakov V.V., White S.M., Kundu M.R.: Sol. Phys., **155**, 339, 1994.
50. Bogod V.M., Grebinskij A.S., Garaimov V.I.: The study of prominence fine structure during RATAN-600 - SOHO support programme in sept.-oct. 1996, Solar Physics Letters, (submitted in 1997, SOLA 7354-S).
51. Chiuderi Drago F., Engvold O., and Jensen E.: The Prominence-Corona Transition Region in Transverse Magnetic Fields, 1992, *Solar Physics*, **139**, 47.
52. Chiuderi Drago F., Radio Observations of Prominences, 1990, Proc of IAU Coll No 117, Hvar, SR Croatia, (Eds. V.Ruzdjak, E. Taunberg-Hanssen, Springer-Verlag), 70.
53. Гараимов В.И.: Обработка массивов одномерных векторов данных в ОС Windows. Программа Work Scan - версия 2.3, Препринт САО РАН 127Т, Нижний Архыз, 1997.
54. Богод В.М., Гараимов В.И., Тохчукова С.Х., Шатилов В.А.: Повышение точности поляризационных наблюдений на РАТАН-

- 600., 1997, «Проблемы современной радиоастрономии», Т.3, стр.40, С. Петербург.
55. Богод В.М., Корольков Д.В. Обнаружение хромосферной сетки в сантиметровом диапазоне длин волн. Письма в АЖ, т.1, № 10, с. 25, 1975.
56. Гараимов В.И., Богод В.М.: Система обработки многоканальных наблюдений Солнца на РАТАН-600, 1997, «Проблемы современной радиоастрономии», Т.3, стр.137, С. Петербург.
57. Schmieder B.: Structural Elements of Filaments, *Solar Physics*, 1992, **141**, 275.
58. Bogod V.M., Grebinsky A.S.: Large Scale Structure of Atmosphere of the Quiet Sun, Coronal Hole and Plages as Deduced by Tomography Study, 1997, *Solar Physics*, **176**, 67.
59. Fontenla, J.M., Rovira, M., Vial, J.-C., Gouttebroze, P.: Prominence thread Models including Ambipolar Diffuzion, 1996, *Ap. J.*, **466**, 496.
60. Bogod V.M., Garaimov V.I., Grebinskij A.S.: High Accuracy Measurements of Prominences Polarization Emission at Radio Wavelengths Using RATAN-600 Observations, 1997, XXIII Assembly of IAU, Kyoto, Abstract book, JD19-014P, p.104.
61. Bogod V.M., Grebinskij A.S., Garaimov V.I.: The Study of Fine Structure of Prominence using Multiwave Radio Observations and Satellite Data, 2-nd ASPE, Final Programme and Abstracts, p.54, Preveza, 1997.
62. Apushkinskij G. and Topchilo N.: How to measure the weak prominence magnetic field by radio observations, in CESRA Workshop on Coronal Magnetic Energy Releases, Caputh, Program and Abstracts, 1994, p 17.