

РГБ ОД

19 АПР 1993

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
СПЕЦИАЛЬНАЯ АСТРОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ

На правах рукописи

БОГОД
ВЛАДИМИР МИХАЙЛОВИЧ

УДК 523.164.32

СПЕКТРАЛЬНО-ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
СОЛНЦА НА РАТАН-600 В МИКРОВОЛНОВОМ ДИАПАЗОНЕ

01.03.03 – радиоастрономия

Диссертация на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук
в форме научного доклада

пос. Н.Армаз – С-Петербург
1993

Работа выполнена в Специальной астрофизической обсерватории
Российской Академии наук.

Официальные оппоненты: -доктор ф.-м.н. М.А.Лившиц
(ИЗМИРАН, г.Москва),
-доктор ф.-м.н. Л.Л.Базелян
(ИРЭ, г.Харьков),
-доктор ф.-м.н. Л.В.Яснов
(С-Петербургский университет).

Ведущая организация: Институт солнечно-земной физики
Сибирского отделения Российской АН,
г. Иркутск

Защита состоится "27" апреля 1993г. в 10 часов
на заседании специализированного совета (шифр Д.003.35.01) по
присуждению ученой степени доктора физико-математических наук при
специальной астрофизической обсерватории Российской АН по адресу :
196140, г.Санкт-Петербург, Пулковое, СПС-Ф. САО РАН,
тел. (812)-12-340-38

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

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеках САО РАН
и Пулковской обсерватории.

Доклад разослан "26" апреля 1993г.

Ученый секретарь
специализированного совета
канд. физ.-мат.наук

 Майорова Е.К.

С о д е р ж а н и е

	стр.
I. Общая характеристика работы.....	5
I.1 Введение.....	5
I.2 Актуальность темы.....	9
I.3 Цель работы.....	10
I.4 Научная и практическая новизна работы.....	10
I.5 Основные результаты, выносимые на защиту.....	11
I.6 Апробация работы.....	12
I.7 Личный вклад автора.....	12
I.8 Структура диссертации.....	13
2. Многоволновый солнечный спектрально-поляризационный комплекс (ССПК) РАТАН-600 и некоторые результаты исследований Солнца..	13
2.1 Требования к аппаратуре для наблюдений Солнца на РАТАН-600.....	13
2.2 Основные параметры и развитие ССПК (1974 - 1990 гг.).....	14
2.3 Наиболее важные астрофизические результаты, полученные на РАТАН-600 с помощью ССПК.....	16
3. Создание панорамного анализатора спектра (ПАС) для исследований Солнца на РАТАН-600.....	33
3.1 Основные предпосылки и разработка проекта модернизации РАТАН-600 для работы по программам 22-го цикла солнечной активности.....	33
3.2 Астрофизические задачи и технические требования к анализатору спектра и поляризации для исследований Солнца....	34
3.3 Общая схема работы ПАС.....	35
3.4 Многоволновый совмещенный облучатель	39
3.5 Система сбора информации на базе IBM PC.....	39
3.6 Система обработки наблюдений Солнца, выполненных на ПАС РАТАН-600.....	41
3.7 Основные параметры ПАС РАТАН-600.....	43

4. Первые результаты исследований радиоизлучения Солнца с помощью ПАС РАТАН-600.....	45
4.1 Примеры наблюдений тонкой спектральной структуры в радиоизлучении Солнца.....	45
4.2 Исследование эффекта неоднократной смены знака поляризации радиоизлучения локальных источников.....	47
4.3 Анализ магнитных полей пятен в короне.....	52
5. Результаты анализа тонких пространственных и спектральных структур на основе кооперативных наблюдений Солнца на РАТАН-600 и больших антеннах апертурного синтеза VLA, WSRT.....	54
5.1 РАТАН-600, VLA, WSRT как взаимно дополняющие инструменты для исследований Солнца.....	54
5.2 Результаты наблюдений по программе "Июль 1982".....	55
5.3 Результаты наблюдений по программе "Июль 1990".....	56
5.4 Результаты сопоставления наблюдений активных областей Солнца в мае 1980 г. на WSRT и на РАТАН-600.....	58
6. Перспективные направления развития исследований Солнца на РАТАН-600.....	61
6.1 Возможное развитие антенных режимов для картографирования Солнца.....	61
6.2 Повышение спектрального и временного разрешения в наблюдениях радиоизлучения Солнца.....	65
7. Заключение.....	66
8. Литература.....	66

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

I.1 ВВЕДЕНИЕ

Спектральные исследования радиоизлучения Солнца являются важным источником информации о физическом состоянии и природе солнечной атмосферы, о происходящих в ней процессах накопления, сохранения и высвобождения энергии, о магнитных полях активных областей.

Значимость таких исследований резко увеличивается при проведении наблюдений с достаточно высоким пространственным разрешением. Именно сочетание анализа спектра и поляризации радиоизлучения с высоким пространственным разрешением дает исключительно эффективный метод изучения физического состояния и процессов в солнечной атмосфере.

В настоящее время такие исследования могут выполняться на радиотелескопе РАТАН-600. Однако они могут быть результативными лишь при постоянном совершенствовании аппаратуры и методов наблюдений. Обеспечение наибольшей возможной эффективности этих исследований и является основной целью диссертации.

Выбор основных направлений исследований, представленных в диссертации, базируется на пионерских исследованиях радиоизлучения Солнца, выполненных Пулковской школой радиоастрономов в период 60-70-х годов, использовавших Большой Пулковский Радиотелескоп (БПР), который обладал для того времени извysшим одномерным пространственным разрешением ($1'$ для волны 3 см).

Наблюдения на БПР выполнялись регулярно в нескольких точках сантиметрового диапазона (волны 2.0 см, 3.2 см, 4.5 см, 6.0 см и 9.0 см) и дали ряд важных астрофизических результатов [1]. Они послужили основой для выбора основных направлений по солнечной радиоастрономии для радиотелескопа РАТАН-600.

Первым шагом на этом пути явилось создание 5-волнового спектрального поляризационного комплекса в диапазоне 2-4 см (волны 2.0, 2.3, 2.7, 3.2 и 4.0 см), основанного на разработке единой типовой схемы радиополяриметров, полностью состоящих из полупроводниковых узлов [1*].

Выбор диапазона был определен следующими факторами: а) резкое отличие интенсивности излучения локальных источников и степени круговой поляризации на волнах 2 см и 3.2 см [47*] по данным БНР, что не укладывалось в представление о чисто тормозном механизме радиоизлучения, б) в этом диапазоне волн могло быть реализовано максимально высокое пространственное разрешение в первых же наблюдениях на РАТАН-600, в) наличие широких полос (~10%) усиления в радиополяриметрах комплекса позволяло достичь высокой чувствительности в измерениях круговой поляризации.

Наблюдения с помощью спектрально-поляризационного комплекса РАТАН-600 начались с 1 ноября 1974 г. [2*]. В дальнейшем, были разработаны еще 5 радиополяриметров на волны: 0.8, 8, 12, 20 и 30 см [5*]. Таким образом, был создан оригинальный комплекс аппаратуры, использование которого в течение более 15 лет (1974-1990 гг.) на РАТАН-600 позволило получить ряд важных астрофизических результатов [21*, 22*, 30, 42*].

Особо следует отметить ряд работ по исследованию структур солнечной атмосферы и диагностики солнечной плазмы, благодаря которым наблюдения Солнца на РАТАН-600 получили широкую известность у нас и за рубежом. К ним относятся:

1. Обнаружение и исследование спектральных характеристик радиогрануляции в сантиметровом диапазоне волн [18*, 20*] и отождествление их с деталями хромосферной сетки [19*].

2. Измерение магнитных полей пятен в короне по их магнитно-тормозному излучению [34*, 26*].

3. Измерение магнитных полей флоккул, корональных петель и протуберанцев по их спектрально-поляризационным характеристикам [30*, 31*].

4. Анализ структуры магнитных полей в короне по детальному анализу инверсии поляризации [2].

5. Открытие некулярных источников - вероятных мест выделения нетепловой энергии в токовых слоях [35*, 37*].

6. Доказательство нетепловой природы дециметрового гало в солнечной активной области [3, 4].

7. Исследование спектра и других параметров корональных дыр [5, 6].

Все эти работы выполнены на аппаратных комплексах, созданных

под руководством и при участии автора. Во многих из них автор непосредственно участвовал в процессе наблюдений, обработки и интерпретации результатов. За время с 1976 по 1990 гг. на основе наблюдений с использованием ССПК РАТАН-600 были выполнены исследования, представленные в более 300 публикаций как во внутрисоюзных, так и в зарубежных журналах.

Многолетний опыт работы с ССПК, а также участие в программах Года Солнечного Максимума (ГСМ) с многоволновым комплексом на РАТАН-600 указал на необходимость более высокого спектрального и временного разрешения, а также на важность в получении двумерных радиоизображений с повышенным пространственным разрешением [25*].

Другим источником, повлиявшим на постановку и выполнение представленных в диссертации работ, было предложение в 1980 г. В.В.Железнякова [7] организовать программу поиска циклотронных линий, поскольку их обнаружение могло бы стать важным инструментом для диагностики состояния активных областей на Солнце.

Наконец, в плане подготовки к исследованиям Солнца и его активности в новом 22-м цикле, рядом ученых и научных коллективов были предложены программы кооперативных исследований: STEP - Solar terrestrial energy program, FLARES'22 - программа исследований вспышек, MAX'91 и другие.

С учетом указанных предложений автором совместно Г.Б. Гельфрейхом, А.Н. Коржавиным и Л.А. Пустильником был разработан проект модернизации РАТАН-600 для проведения солнечных наблюдений в 22-м цикле солнечной активности, который включал в себя [5*, 30*, 31*]:

1) перекрытие всего диапазона радиотелескопа РАТАН-600 с равномерным спектральным разрешением (несколько %) и более детальным анализом выбранного участка спектра,

2) реализацию режимов многократных наблюдений с целью анализа динамики структуры активных областей на промежутках времени в несколько часов,

3) разработку радиогелиографа на базе РАТАН-600 на нескольких длинах волн с разрешением до 10 сек. дуги по обеим координатам.

Этот проект был одобрен научной общественностью и в 1989 г. была начата работа по теме "22-цикл", которая получила целевое финансирование Академии Наук. Но финансирование работ было только

в течение 2-х лет. Потом оно прекратилось, что привело к урезанию объема намеченных разработок. Однако, нам все же удалось реализовать одно из направлений проекта модернизации и создать панорамный анализатор спектра (ПАС), перекрывающий диапазон от 3.5 ГГц до 18 ГГц с 5% частотным разрешением.

В приемную систему ПАС подключены дополнительно три одноволновых радиополяриметра на волны 12 см, 20 см и 30 см. Таким образом был перекрыт диапазон частот от 1 до 18 ГГц на 35 длинах волн с регистрацией интенсивности и круговой поляризации радиоизлучения по всем 70 каналам.

Этот новый приемный комплекс находится в регулярной эксплуатации с 20 декабря 1991 г. и на нем уже проведен ряд наблюдений по международным программам 22-цикла солнечной активности.

В диссертации приводятся первые результаты исследований радиоизлучения Солнца с помощью ПАС РАТАН-600. К ним относятся: во-первых, значительное повышение точности развитых ранее методов измерения магнитных полей, во-вторых, обнаружение эффекта неоднократной смены круговой поляризации в областях квазипоперечных магнитных полей в короне. Показано, что исследования структуры магнитных полей с помощью обнаруженного эффекта могут быть направлены на построение трехмерной картины магнитосферы над активными областями, что открывает перспективу дальнейших исследований как в области решения задач собственно физики Солнца, так и в прикладном аспекте солнечно-земных связей.

В диссертации также представлены результаты кооперативных наблюдений Солнца на РАТАН-600 и больших антенн апертурного синтеза типа VLA (США) и WSRT (Голландия). Данные этих двух крупнейших радиотелескопов существенно дополняют друг друга: РАТАН-600 позволяет производить подробный спектральный анализ в широком диапазоне волн и точные поляризационные измерения, в то время как VLA и WSRT дают детальные двумерные изображения активных областей Солнца, но только на немногих отдельных частотах. При интерферометрических наблюдениях также теряется часть потока, связанного с протяженными источниками. Т.о. комбинированное использование параллельных наблюдений на двух инструментах позволило получить качественно новое и значительно более полное

представление о структуре и свойствах Л.И. на Солнце.

В последнем разделе диссертации в качестве обобщения имеющегося опыта рассматриваются также проблемы исследований Солнца на РАТАН-600 в будущем. Показано, что РАТАН-600 обладает для этого большим потенциалом.

В качестве основного направления предлагается создание многоволнового радиогелиографа с высоким временным разрешением для анализа всплесков радиоизлучения, разработка компаунд-интерферометра на базе РАТАН-600 с добавлением системы малых зеркал.

И, наконец, дальнейшее улучшение спектрального и временного разрешения значительно расширяет класс солнечных проблем для исследования на радиотелескопе - от миллисекундных спеек до исследований циклотронных линий солнечного радиоизлучения.

1.2 АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ

Изучение физики Солнца, природы солнечно-земных связей представляет собой важное звено в познании непосредственно окружающего и воздействующего на нас внешнего мира.

Радиоастрономические методы исследования Солнца являются сегодня одним из важных средств получения данных о природе верхних наиболее горячих слоев солнечной атмосферы и дают независимую от других методов информацию для диагностики солнечной плазмы.

Эффективность радиоастрономических методов существенно зависит от сочетания пространственного и спектрально-поляризационного анализа радиоизлучения Солнца в широком диапазоне волн.

Крупнейший в России радиотелескоп РАТАН-600 дает уникальную возможность для проведения детальных исследований плазмы солнечной атмосферы. Однако для реализации эффективности таких исследований необходимо было оснастить радиотелескоп комплексами спектрально-поляризационной аппаратуры. Выполнение этой программы и составляет центральное ядро диссертации. В результате были созданы два мощных спектральных комплекса, являющихся основой для получения целого ряда новых сведений о природе радиоизлучения и физическом состоянии и структуре целого ряда солнечных образований.

I.3 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Создание и дальнейшее развитие аппаратурных комплексов и методов для исследования Солнца на радиотелескопе РАТАН-600.

2. Проведение исследований радиоизлучения Солнца с помощью разработанных комплексов с целью диагностики параметров плазмы и изучения структуры солнечной атмосферы.

3. Проведение комплексных кооперативных исследований Солнца на радиотелескопе РАТАН-600 совместно с большими антеннами апертурного синтеза (VLA, WSRT).

4. Разработка направлений дальнейшего развития исследований Солнца на РАТАН-600.

I.4 НАУЧНАЯ И ПРАКТИЧЕСКАЯ НОВИЗНА РАБОТЫ

1. Впервые в семидесятых годах были реализованы спектрально-поляризационные наблюдения в диапазоне 2 - 4 см с угловым разрешением в десятки угловых секунд дуги, что позволило получить ряд новых астрофизических результатов.

2. Впервые в сантиметровом диапазоне обнаружена тонкая структура в распределении яркости по диску спокойного Солнца (радиогрунтля); и определены основные параметры этой структуры и установлена ее связь с деталями хромосферной сетки.

3. Впервые на основе спектрально-поляризационных наблюдений реализован метод измерения магнитных полей пятен в основании короны по циклотронному излучению локальных источников.

4. Впервые радиоастрономическим методом измерено магнитное поле флоккула на нескольких уровнях атмосферы, а также оценены вертикальные градиенты температуры и магнитного поля в нем.

5. Впервые сделаны оценки кинетической температуры эллипсоидального протуберанца в сантиметровом диапазоне волн, а также оценки магнитного поля и градиента температуры.

6. Впервые реализованы радиоастрономические наблюдения Солнца, в которых высокое угловое разрешение (десяти секунд дуги в коротковолновой части сантиметрового диапазона и единицы минут дуги в дециметровом диапазоне) сочетается с широким многооктавным

перекрытием по частотному диапазону (от 1 до 18 ГГц) и подробным 5% спектральным анализом с одновременным измерением круговой поляризации.

7. Впервые достигнута высокая точность (до 2-3%) измерения напряженности магнитного поля в короне над пятнами на основе анализа теплового циклотронного излучения радиоисточника.

8. Обнаружен эффект неоднократной смены знака круговой поляризации радиоизлучения локальных источников по частотному диапазону.

9. На основе кооперативных наблюдений Солнца на VLA, WSRT и RATAN-600 проведен анализ тонких пространственных и спектральных структур активных областей и получены уникальные сведения о структурах ряда активных областей на Солнце.

1.5 ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ, ВНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Создание спектрально-поляризационного приемного комплекса для наблюдений Солнца на RATAN-600, на котором велись наблюдения в период 1974 - 1990 гг. и позволившие получить ряд значимых астрофизических результатов.

2. Обнаружение и исследование радиогрануляции в сантиметровом диапазоне волн.

3. Разработка и реализация методов измерения магнитных порлей пятен в короне. Результаты статистического сравнения с оптическими значениями поля.

4. Реализация метода измерений магнитных полей флоккул и протуберанцев на RATAN-600 по поляризации и спектру тормозного излучения. Результаты анализа магнитных полей.

5. Разработка программы модернизации RATAN-600 для солнечных исследований в 22-м цикле активности. Разработка и создание панорамного анализатора спектра в диапазоне 1 - 18 ГГц на RATAN-600.

6. Первые результаты анализа тонкой структуры спектров солнечного радиоизлучения, включающие:

- повышение точности измерения магнитных полей в короне над пятнами до 2-3%.

- обнаружение эффекта неоднократной смены знака круговой

поляризации радиоизлучения локальных источников по частотному диапазону.

7. Результаты совместных исследований активных областей Солнца на основе кооперативных наблюдений на РАТАН-600 и больших антенн апертурного синтеза (VLA, WSRT).

1.6 АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ

Основные положения и результаты работы докладывались на ряде конференций по солнечной радиоастрономии, международных симпозиумах и коллоквиумах, в том числе на:

Всесоюзных радиоастрономических конференциях (Горький, 1973, Пушкино, 1975г., Ереван, 1978, 1982, 1985, 1989, 1990, Иркутск, 1986, Звенигород, 1984.); Всесоюзных научных семинарах объединенной секции "Радиоизлучение Солнца" Научных Советов по радиоастрономии и физике солнечно-земных связей (Кисловодск 1978, Алма-Ата, 1987, Одесса, 1985, Самарканд 1989), 12-th regional consultation on solar physics, Smolenice, Czechoslovakia, 1986, 5-й симпозиум КАПГ по солнечно-земной физике, Самарканд, 1989, Симпозиум КАПГ, Ленинград, 1987, International Workshop, Simpheropol 1982, Irkutsk, 1985, Международное совещание по физике Солнца, Шенхаген, ГДР, 1989, Colloquium IAU No.141, China, 1992.

1.7 Личный вклад автора

Автору принадлежат следующие результаты:

Разработка проекта и реализация солнечного спектрально-поляризационного комплекса для радиотелескопа РАТАН-600, который использовался для наблюдений Солнца в период с 1974 по 1990 гг.

Разработка методики и проведение наблюдений по обнаружению радиогрануляции и исследованию ее параметров.

Практическая реализация методов измерения магнитных полей пятен и флоккул, обработка и статистический анализ наблюдательного материала.

Участие в разработке программы модернизации РАТАН-600 для исследования Солнца в 22-м цикле активности.

Руководство разработкой и прямое участие в создании

панорамного анализатора спектра в диапазоне 1-18 ГГц.

Обработка наблюдательных данных и получение первых результатов исследования тонкой структуры спектров солнечного радиоизлучения на панорамном анализаторе спектра в диапазоне 1-18 ГГц.

Обработка совместных наблюдений Солнца на RATAN-600 и больших антеннах апертурного синтеза VLA и WSRT и участие в интерпретации результатов.

1.8 СТРУКТУРА ДИССЕРТАЦИИ

Работа состоит из семи разделов: введения, двух методических разделов, двух разделов, описывающих результаты исследований, раздела, описывающего перспективные направления развития исследований на RATAN-600 и Заключение. Работа содержит 4 таблицы и 18 рисунков.

2. МНОГОВОЛНОВЫЙ СОЛНЕЧНЫЙ СПЕКТРАЛЬНО-ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЙ КОМПЛЕКС (ССПК) РАТАН-600 И НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СОЛНЦА

2.1 ТРЕБОВАНИЯ К АППАРАТУРЕ ДЛЯ НАБЛЮДЕНИЯ СОЛНЦА НА РАТАН-600

Солнечный спектрально-поляризационный комплекс [2*] был разработан в 1974 г. и состоял сначала из пяти отдельных радиополяриметров на волны 2.0 см, 2.3 см, 2.7 см, 3.2 см и 4.0 см, собранных по единой типовой схеме. В качестве системы регистрации использовался комплекс аппаратуры УАР, разработанный в СКБ ИРЭ [8]. В дальнейшем, на основе аппаратуры КАМАК и ЭВМ "Электроника-100 И" З.Е.Петровым [5*, 9] был разработан автоматизированный вариант системы сбора информации ИНАР-16, который значительно повысил результативность системы регистрации за счет интеллектуальной оценки уровня сигнала по каждому каналу и осуществления необходимых переключений усиления.

Основные требования к аппаратуре вытекали из специфики наблюдений Солнца на RATAN-600, которые заключались в том, что RATAN используется преимущественно как пассажный инструмент и

большая часть наблюдений проводится в режиме прохождения источника через диаграмму направленности радиотелескопа. Поэтому основное требование - высокая чувствительность - было необходимо для решения следующих задач:

- наблюдение опорных космических источников,
- измерение параметров антенны,
- проведение калибровочных работ по телескопу,
- измерение минимально обнаружимых степеней поляризованных сигналов (до малых долей процента).

К аппаратуре также предъявлялись требования большого динамического диапазона $T_{a_{max}} / T_{a_{min}} \sim 10^5$, малого уровня инструментальных погрешностей при измерении круговой поляризации (менее 0.5%), а также требование высокой надежности, важное для сложных многоэлементных систем и требования высокой временной и температурной стабильности (стабильность параметров не хуже 2% / час).

2.2 ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ И РАЗВИТИЕ ССПК (1974 - 1990 гг.)

Одновременно с наблюдениями проводилась модернизация комплекса [4*, 6*, 7*] и увеличение количества радиополяриметров ССПК, в результате число регистрируемых каналов было доведено до 20 к 1982 г. Радиополяриметры перекрывали рабочий диапазон радиотелескопа на десяти длинах волн, и система регистрации ИКАР-16 уже не справлялась со сбором информации такого многоканального приемного комплекса. В связи с этим, З.Е.Петровым была начата, а В.А.Шатиловым завершена новая разработка автоматизированной системы регистрации ИКАР-32 на базе ЭВМ "ДВК-3" и аппаратуры стандарта КАМАК [10]. В таблице I приведен перечень всех радиополяриметров ССПК и их основные параметры.

Основная программа наблюдений Солнца выполнялась на облучателе №.3, который мог перемещаться по кольцевому пути в режиме антенны "Южный сектор + плоский отражатель". При этом, кроме режима однократных наблюдений Солнца в меридиане, в отдельные периоды были реализованы многократные прохождения с интервалом до 15 мин. между соседними экспозициями в течение 2 часов до и 2 часов после момента кульминации Солнца [38*, 42*]. Для этого на Южном секторе

ПАРАМЕТРЫ СОЛНЕЧНОГО СПЕКТРАЛЬНО-ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО
КОМПЛЕКСА РАТАН-600

ВОЛНА	ЦЕНТР. ЧУВСТВИТ. ПОЛОСА	ПАРАМЕТРЫ	ДИАГРАММА
λ	ЧАСТОТА ПРИ $\tau \approx 1$	РЕГИСТРАЦИИ	РАДИОТЕЛЕСКОПА
		(СТОКСА)	E-W N-S
см	ГГц	МГц	arcsec arcmin
0.9	34.0	0.3	600 I.V 8 5.6
2.0	15.0	0.2	600 I.V 18 12.5
2.3	13.0	0.12	600 I.V 21 14.4
2.7	11.1	0.12	600 I.V 25 16.9
3.2	9.4	0.19	500 I.V 29 20.0
4.0	7.5	0.2	600 I.V 36 25.0
6.0	5.0	0.1	600 I.V 54 37.5
8.0	3.7	0.2	500 I.V 72 50.0
13.0	2.3	0.2	300 I.V 120 81.0
21.0	1.45	0.2	220 I.V 190 131.0
31.0	0.96	0.2	150 I.V 279 193.0

используется собирающая поверхность из 125-140 отражающих элементов, что соответствует прямоугольному раскрыву антенны в картинной плоскости приблизительно 260 м х 5.5 м. Наблюдения в каждом азимуте выполняются на 10 длинах волн ССПК в диапазоне 0.8-32 см с анализом круговой поляризации и с регистрацией сигнала с помощью автоматизированной системы сбора ИКАР. Интеллектуальный комплекс автоматической регистрации (ИКАР) управляет процессом регистрации сигналов и обеспечивает в реальном времени выбор оптимальных коэффициентов усиления при цифровой записи сигналов на магнитную ленту (отсчеты с интервалом 0.1 сек. по каждому каналу). ИКАР также обеспечивает по заданной программе производство калибровок и их оперативную обработку [11]. С помощью той же системы обеспечиваются наблюдения опорных источников (Крб, Орион, 3C 273, 3C 84, Луна), результаты которых используются для контроля и определения параметров антенны, необходимых для измерения потоков, координат, размеров точечных (12-15 угл. сек) и протяженных радиоисточников на Солнце. Точность поляризационных измерений на всех волнах не хуже 0.5%. Для создания архивов наблюдений Андриановым С.А. [12] была разработана двухуровневая система хранения данных. В формате архива уровня 1 данные наблюдений хранятся без всяких изменений, а в формате уровня 2 в обработанном виде, т.е. после операций сжатия данных, учета калибровок, исправления за аберрации и др.

Расчетная ширина диаграммы направленности антенны на всех волнах ССПК также приведена в таблице 1. Как правило, эти параметры близки к реализуемым (после учета аберрационных искажений, обусловленных выносом рупоров приемников из главного фокуса), за исключением волны 0.8 см, близкой к предельной.

2.3 НАИБОЛЕЕ ВАЖНЫЕ АСТРОФИЗИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ НА РАТАН-600 С ПОМОЩЬЮ ССПК

Основные результаты, полученные в период 1974-1990 гг. сведены в таблицу 2. Показано, что на РАТАН-600 исследуется широкий спектр солнечных объектов, обнаруживаются новые явления, ставятся проблемы дальнейших исследований.

Резюме. Уже в первый год работы РАТАН-600 в сантиметровом

Табл. 2 Результаты исследования Солнца, полученные на РАТАН-600

РАЗДЕЛ	ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ	ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ
Спокойное Солнце	Распределение яркости на лимбе	Равномерный лимб Стабильность в цикле
	Радиогрануляция	Обнаружение, параметры, температура, град.Т
	Протуберанцы	Спектр ярк. температур, Уменьшение радиорadiusа,
Области попущенной яркости	Корональные дыры	Размеры, спектры
	Волокна	Отождествление в см-диапазоне
	Полости волокон	Поля пятен в короне, корреляция с оптикой
Измерение магнитных полей	Циклотронный механизм	Поля флоккул, корона-ных арок, протуберанцы
	Тормозное излучение	Поля в короне до высот $H=120 \cdot 10^3$ км
	Инверсия знака поляризации	Изменение направления плоскости поляризации
Активные области	Фарадеевское вращение	Температура, градиент температуры и поля
	Флоккулы	Температура, плотности, структура, поле
	Корональные конденсации	Температура, градиент температуры, структура, связь с активностью
	Петли	Новый тип источников, локализ энерговид-ния
	Нятонные источники	Натепповой спектр, Бесструктурность
	Пекулярные источники	Отождествление на см- волнах, спектр I и V
Вспышки	Дециметровое гало	Спектр, поляризация, механизмы генерации
	Мм-источники в короне	Многокомпонентность простых вспышек
	Медленные всплески	
	Импульсные всплески	

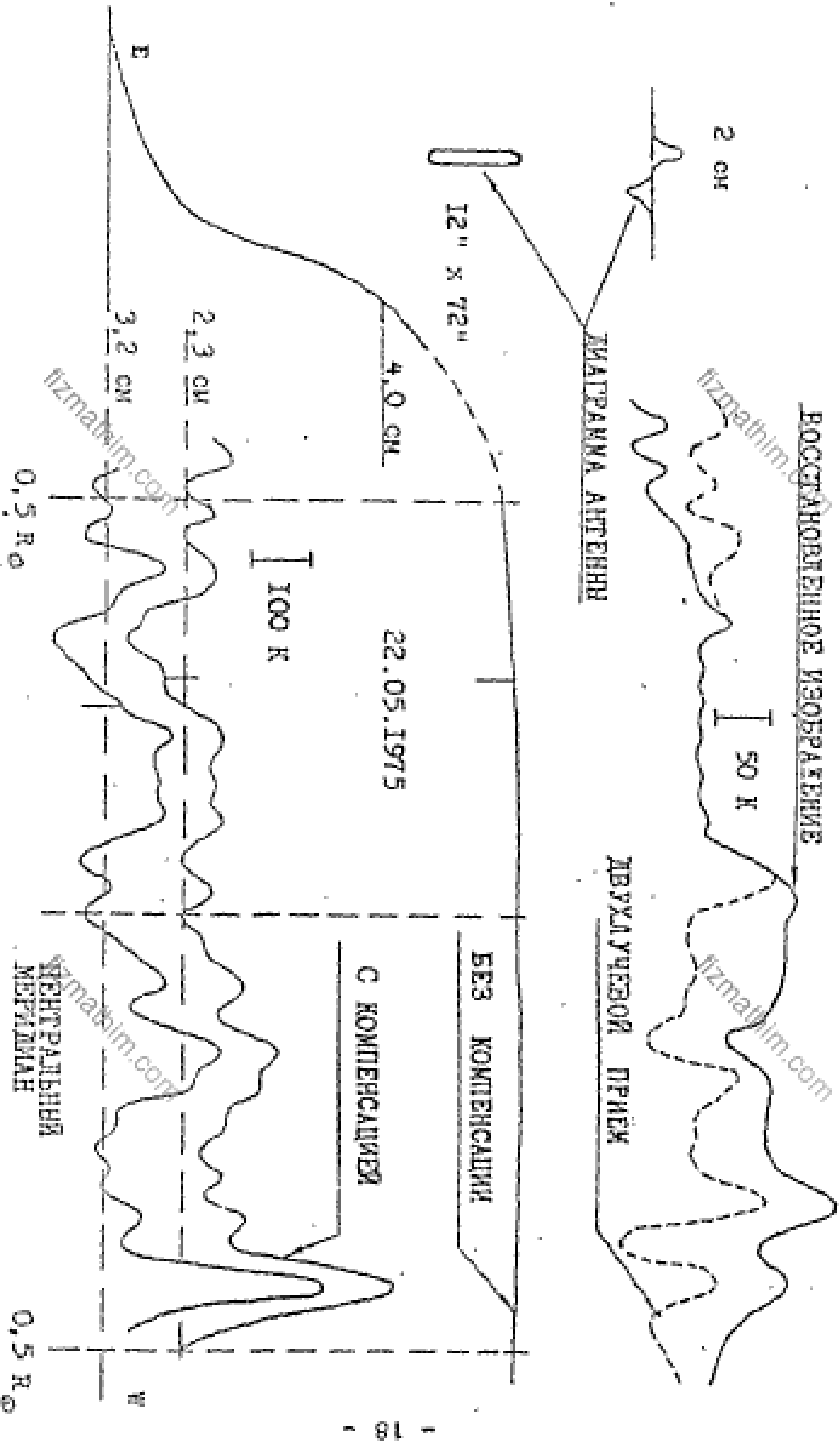
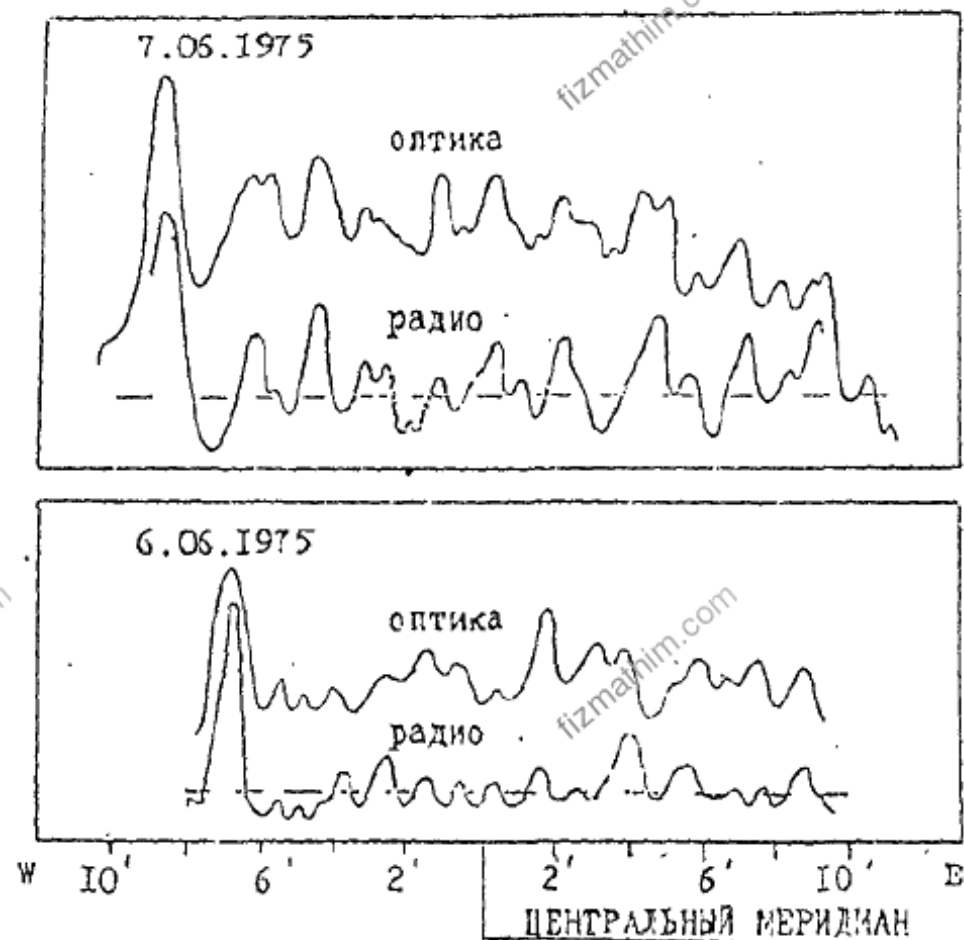


Рис. 1-1. Демонстрация наблюдений малоконтрастных солнечных образований методом близкого сканирования (а) и компенсации (б).



Дата	Диапазон	Ширина щели диаграммы	Момент набл.	Δt	Коэфф. корреляции
7.06.1975	K Ca II	12" x 72"	7 ^h 58 ^m UT	1 ^h 14 ^m	0,71
	2,3 см	12" x 72"	9 ^h 12 ^m UT		
6.06.1975	K Ca II	12" x 100"	7 ^h 45 ^m UT	1 ^h 26 ^m	0,67
	2,3 см	12" x 72"	9 ^h 11 ^m UT		

Рис. 1-2. Примеры наблюдения радиогрануляции на волне 2,3 см и сопоставление со структурой хромосферной сетки по данным Римского журнала *Solar Phenomena* в линии Ca II. Оптические сканы получены фотометрированием фотографии хромосферной сетки щелью, равной диаграмме радиотелескопа на той же длине волны.

диапазоне было обнаружено радиоизлучение мелкомасштабной структуры спокойного Солнца (см. Рис.1-1). Были проведены спектральные исследования этой структуры в диапазоне 2-4 см, измерены контрасты по яркостным температурам и характерные размеры [20*]. Оптическое отождествление проводилось как по публикуемым данным Римской обсерватории в линиях H_{α} и Ca II (Рис.1-2), так и по результатам совместных одновременных наблюдений с группой ГАИШ [19*]. Оно показало, что яркие детали радиогрануляции соответствуют границам хромосферной сетки (границам супергранул), областям со сгущением магнитных силовых линий.

Флуктуации потока радиоизлучения, обусловленные радиогрануляцией, находятся в пределах $(60 - 300) \cdot 10^{-26}$ Вт/м² Гц.

Контраст яркостных температур, вычисленный для центра и границ супергранул, составил (5000-12000)К.

Спектральный и корреляционный анализ данных показал три характерные группы размеров (42"-82"), (102"-156") и (190"-280").

Тепловой механизм излучения, определенный по спектру потоков радиогрануляционной структуры, позволил сделать оценку величины магнитного поля, такой структуры, усредненную по площадке 24" x 2.4', которая не превышает 3 Гс.

Время жизни такой структуры измеряется несколькими часами, но за сутки она меняется практически полностью.

Протуберанцы. Обычно наблюдения протуберанцев в сантиметровом диапазоне чрезвычайно трудны из-за их близости к лимбу Солнца, где температурные градиенты велики. На Рис.2а и б показан пример регистрации протуберанца на нескольких длинах волн сантиметрового диапазона [31*]. Эти наблюдения и сравнение их с оптическими данными позволили определить следующие его параметры:

- Радиоизлучение активного протуберанца имеет тепловой характер, в соответствии со спектром яркостных температур.
- Яркостные температуры для наиболее яркой детали протуберанца находятся в пределах $(20-30) \cdot 10^3$ К для диапазона 2-4 см.
- Оценка магнитного поля, сделанная по степени круговой поляризации не превосходит 107 Гс.
- Величина температурного градиента на границе протуберанца и короны составляет 3 ± 0.5 К/км.
- Дана оценка концентрации электронов частиц в протуберанце -

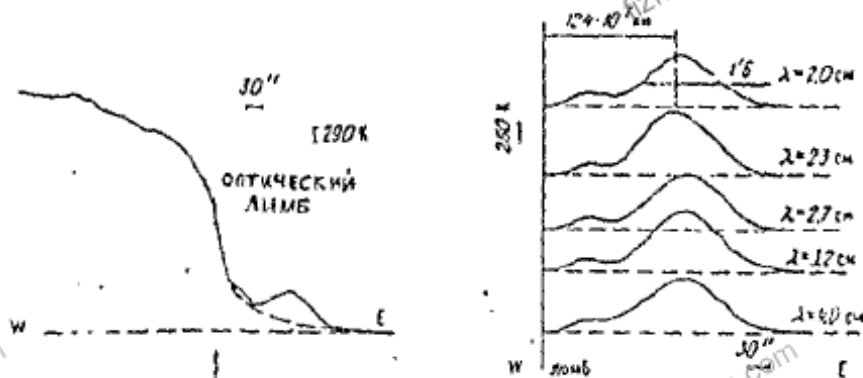


Рис.2а. Радиоизображение протуберанца 18.10.1977 г. на волне 2.3 см (слева) и его спектр на пяти длинах волн в диапазоне 2-4 см (вычтен сигнал спокойного Солнца).

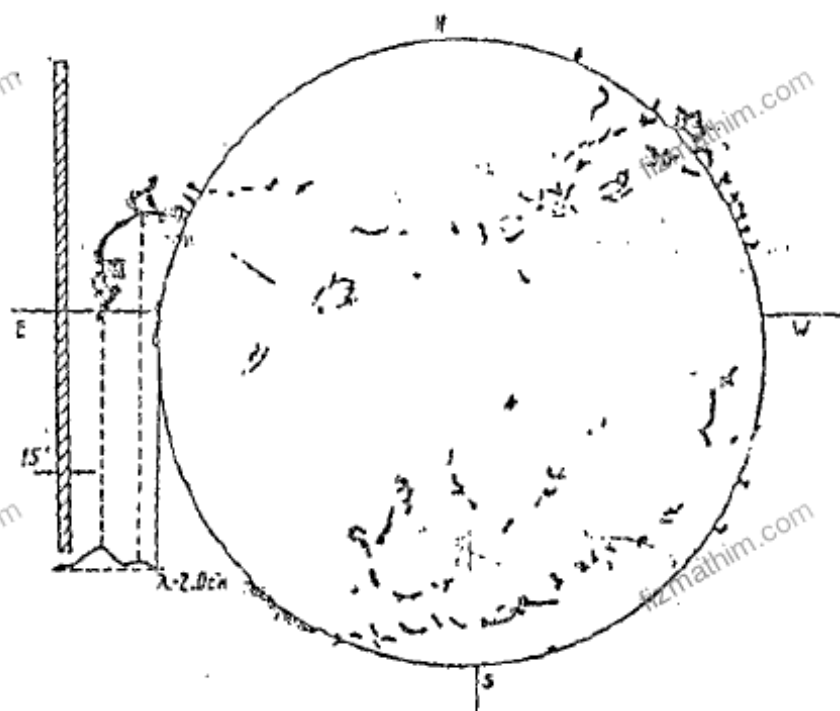


Рис.2б. Оптическое отождествление радиоизлучения протуберанца (данные в линии H_{α} высокогорной станции в Алма-Ате).

$$3 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}.$$

флюккул, магнитное поле флюккул. Применение радиотелескопа РАТАН-600 для изучения радиоизлучения малоcontrastных солнечных объектов таких как флюккулы, корональные конденсации и петли, протуберанцы и радиогрануляционная структура, позволило получить данные о ряде их характеристик и реализовать радиоастрономические методы измерения магнитного поля в них. Радиоизлучение таких образований (в соответствии со спектрами яркостных температур, полученные для них на РАТАН-600 [20*, 30*, 31*]) носит тепловой характер.

Тепловое тормозное излучение (bremsstrahlung) в присутствии магнитного поля генерирует циркулярно поляризованное излучение с избытком несвязанной волны [24]. Для слабых магнитных полей (частота излучения $\omega_0 \ll \omega_H$ гирочастоты) Г.Б.Тельфрейхом было получено решение уравнения переноса [13, 30*], которое привело к следующей формуле для продольной компоненты магнитного поля:

$$B = 107 P [\%] / n \lambda ,$$

где P - степень поляризации в [%].

n - спектральный индекс (находится из наблюдений),

λ - длина волны в см .

Наклон спектра n может меняться в широких пределах. Так, для корональной конденсации (случай оптически тонкого излучения) $n \approx 2$, тогда как для непрозрачного объекта n зависит от градиента температуры, а для изотермичной плазмы $n=0$. В последнем случае измерения магнитного поля невозможны (нет поляризации). Для многих случаев $n \approx 1$, и чувствительность метода зависит от ширины полосы радиометра и соотношения размеров источника и диаграммы радиотелескопа η ,

$$\delta B_1 = 100 \eta / \sqrt{\Delta f} ,$$

считая постоянную времени $\tau = 1 \text{ с}$. Формула предполагает, что чувствительность по магнитному полю, усредненная по диаграмме антенны $\eta = 1$, равна 0.01 Гаусс (для полосы приема равной 100 МГц). Реально вертикальный размер диаграммы РАТАН-600 в режиме

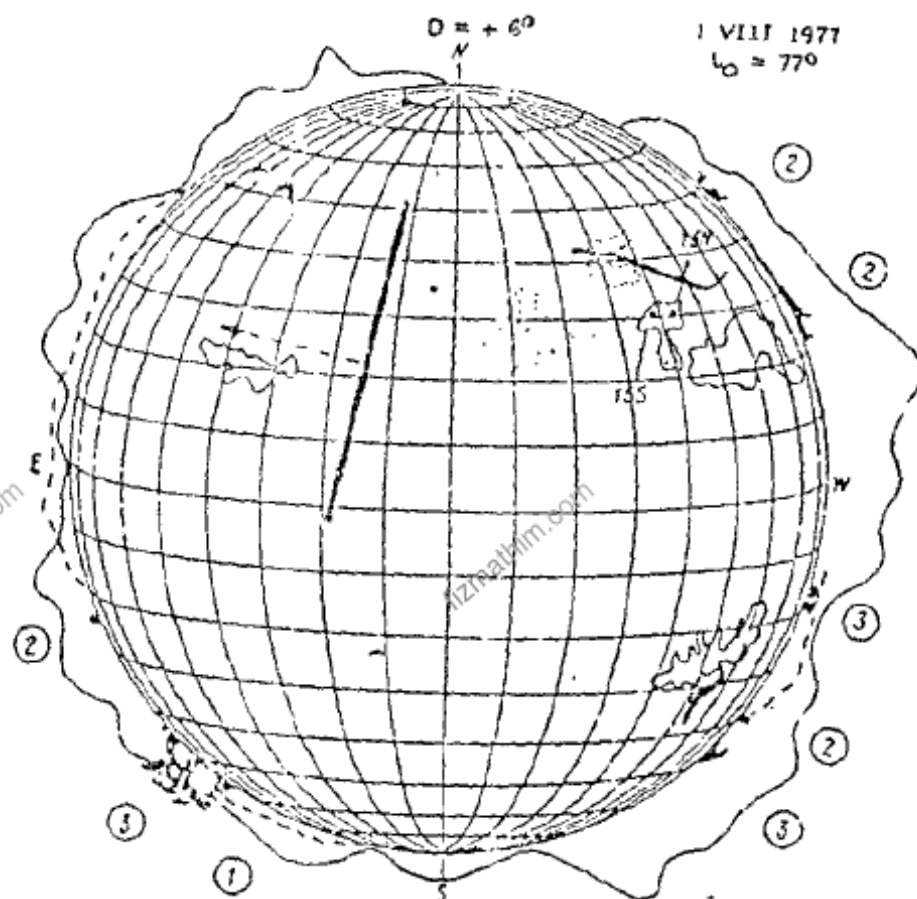


Рис.3. Положение Флоккула на диске Солнца 1.08.1977г. относительно диаграммы антенны. Приведен размер вертикальной диаграммы по уровню половинной мощности для волны 2 см.

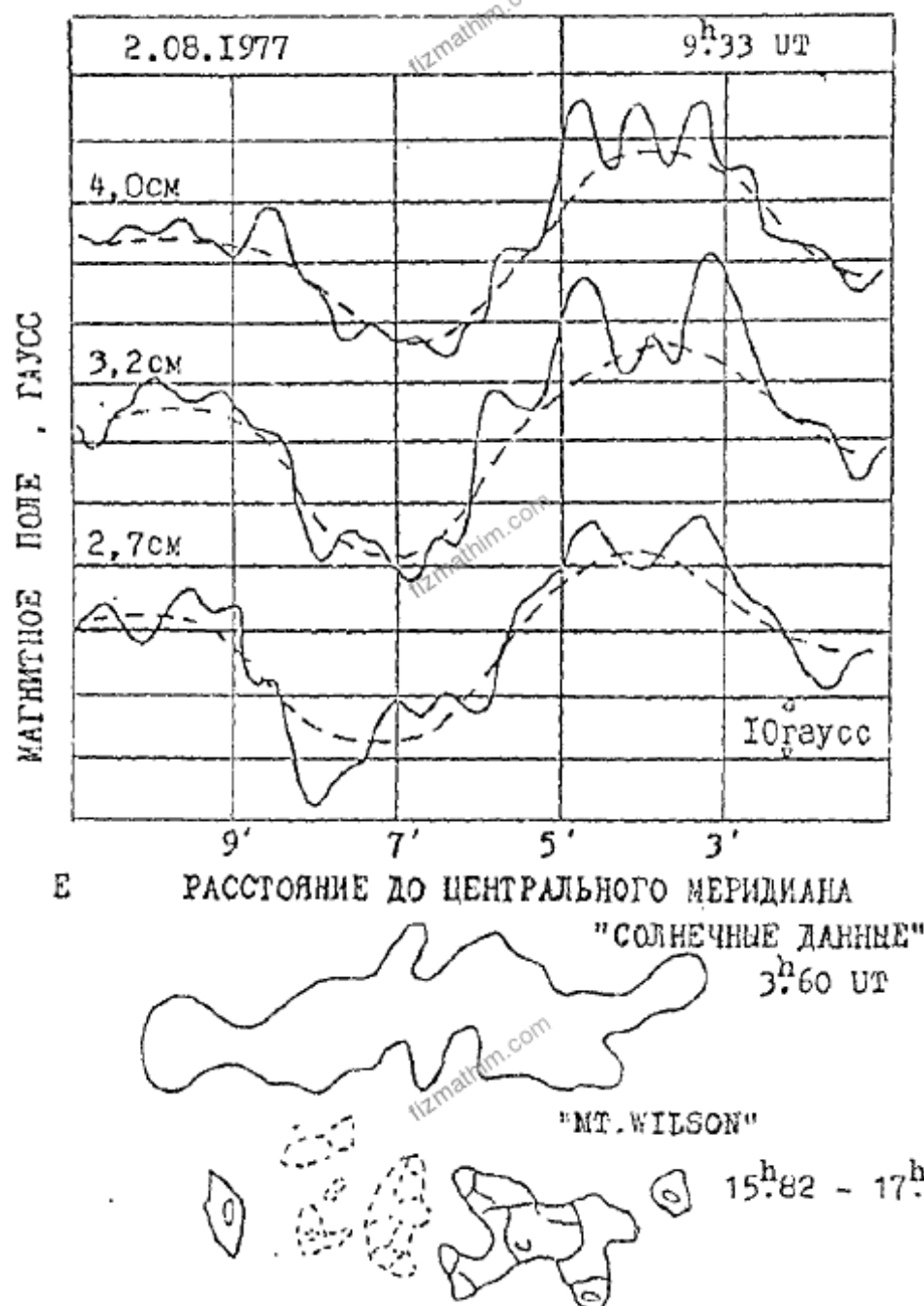


Рис.4. Расчетное распределение магнитного поля по флоккулу. Внизу приведено оптическое изображение флоккулярного поля в линии H и участок карты магнитного поля по данным обсерватории в Маунт-Вилсоне. Точность сопоставления - 15. Для оптической карты уровни магнитного поля даны т.о.: ± 5 , ± 10 , ± 20 , ± 40 , ± 80 (Гс). Северная полярность магнитного поля на карте показана сплошными линиями, а южная пунктирными.

Южный сектор + перископ для волны 2 см равен $\approx R_0$. И для большинства случаев реальная чувствительность может быть ниже на два порядка, но все же еще весьма высока т.е. ≈ 1 Гаусс. Для обеспечения такой чувствительности приходится специально исследовать и учитывать тонкие инструментальные эффекты, в частности, антенную поляризацию. Изложенный метод позволяет построить "радиоманитограф" [3*], который фактически был реализован автором на радиотелескопе РАТАН-600.

Метод был применен для измерения распределения магнитного поля по флоккулу на основе многоволновых наблюдений (см. Рис.3 и Рис.4). Сравнение радио и оптических измерений показало, что величины магнитных полей флоккула находятся в хорошем согласии. Флоккул представляет собой биполярную структуру: его правополяризованное излучение в радио соответствует магнитному полю северной полярности в оптике, что говорит об избытке необыкновенной волны. На основании теплового механизма радиоизлучения флоккула были определены и другие его характеристики: градиент температуры по лучу зрения $dT/dl \approx 1000$ К/км и распределение градиентов по длинам волн в диапазоне, что характеризует структуру переходного слоя над флоккулом.

Магнитные поля пятен. Солнечные пятна являются областями концентрации сильных магнитных полей на уровне фотосферы, которые определяют активность Солнца и оказывают, в связи с этим, влияние на физические процессы в верхних слоях его атмосферы. Спектрально-поляризационные наблюдения локальных источников, проводимые на РАТАН-600, позволили реализовать метод измерения магнитных полей в атмосфере над пятнами (на высотах 1000 км-3000 км) [50*] и оценить градиенты поля [25*, 32*]. Над каждым пятном в поляризованном по кругу излучении в сантиметровом диапазоне по наблюдениям на РАТАН-600 мы видим четко выраженный узкий источник (с размерами 10"-30") (см., например, Рис.5). По целому ряду параметров (наклону спектра, величине яркостной температуры, избытку в излучении необыкновенной волны, степени круговой поляризации) надежно установлено, что природа этих "радиоядер" обязана циклотронному излучению тепловых электронов солнечной короны в сильных магнитных полях пятен. Интерпретация ядер как источников магнито-тормозного механизма излучения предполагает, что корона над пятнами должна опускаться

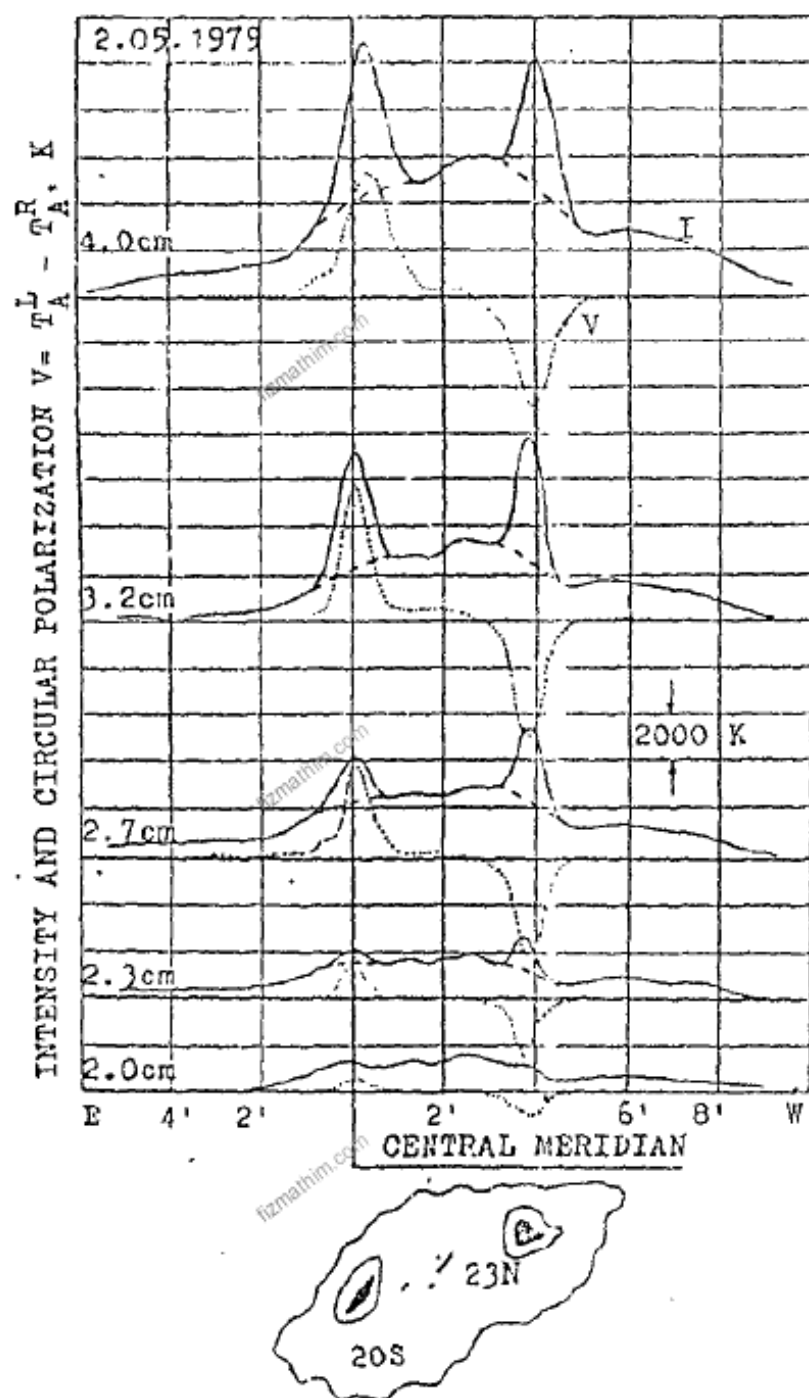


Рис.5. Пример регистрации активной области с четко выраженными головным и хвостовым пятнами в диапазоне 2-4 см. Записи круговой поляризации показаны пунктиром. Избыток излучения соответствует излучению необыкновенной волны. Оптическое изображение области взято из бюллетеня "Солнечные Данные" для группы №. 193, 2 Мая, 1979 (№ 15, E15).

до малых высот, не превосходящих немногие тысячи км [15].

В основе метода измерения магнитного поля лежат простые и достаточно общие предположения, согласно которым магнитное поле над пятном монотонно спадает с высотой, а кинетическая температура плазмы резко возрастает с хромосферных значений $T_{\text{хр}} = 10^4$ К до корональных $T_{\text{кор}} = 10^6$ К. При этом слои, соответствующие более высоким гармоникам гирочастоты, располагаются на больших высотах в солнечной атмосфере. Для каждого пятна можно выбрать такой диапазон длин волн, для которого слой определяемый условием $\omega = 3\omega_H$ находится в области корональных или субкорональных температур (10^5 К - 10^6 К), а слой $\omega = 2\omega_H$ - в области хромосферных температур (10^4 К). При этом результирующее излучение полностью определяется слоем $\omega = 3\omega_H$. Вклад в излучение от высоких слоев, находящихся в короне $\omega = 4\omega_H, 5\omega_H \dots$ довольно мал ввиду их прозрачности ($\tau = 10^{-3} - 10^{-7}$, $T_{\text{эфф}} = \tau T_{\text{кор}} = 10^3$ К), а вклад более глубоких слоев также мал из-за низкой кинетической температуры хромосферы ($T_{\text{хр}} = 10^4$ К). Для третьей гармоники гирочастоты магнитное поле

$$H \text{ [гаусс]} = 3570 / \lambda' \text{ [см]}.$$

Эта формула и используется при измерениях поля. Наличие спектральных наблюдений позволяет определить и частоту, при которой уровень $\omega = 2\omega_H$ выходит в корону, при этом наблюдается излом в спектре и возможна вторая оценка величины магнитного поля по формуле

$$H \text{ [гаусс]} = 5400 / \lambda \text{ [см]}.$$

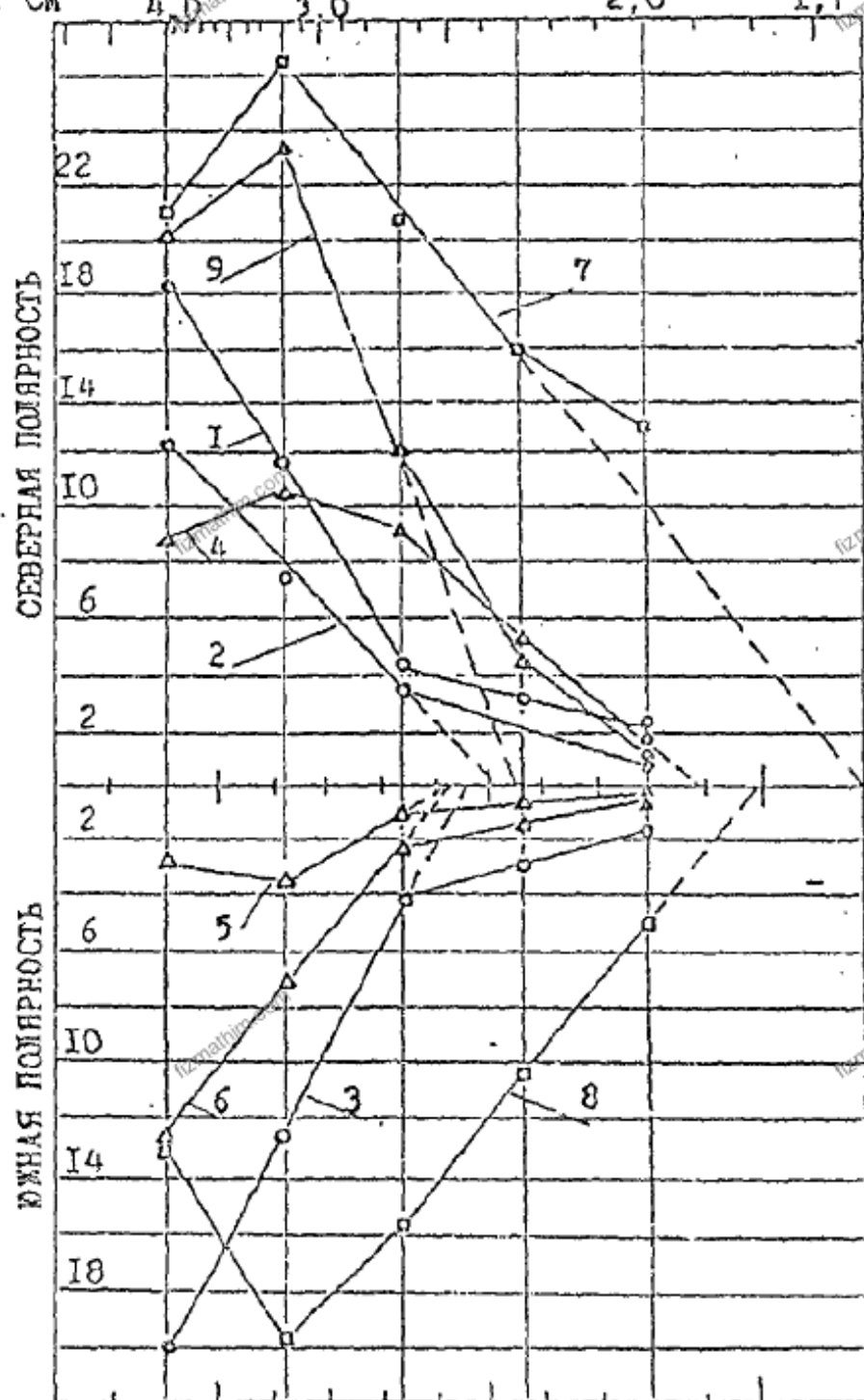
Описание основных методов измерения напряженности полей в нижней короне по данным наблюдений Солнца на РАТАН-600 можно найти, например, в [33]. При этом в наших исследованиях были использованы преимущества РАТАН-600 как рефлекторного радиотелескопа, обеспечивающего параллельные наблюдения на ряде волн сантиметрового диапазона в сочетании с точным измерением степени круговой поляризации при умеренном одномерном разрешении (до 10 сек. дуги) [42*1].

Анализ магнитных полей большого числа пятен показал, что

- 28 -

ДЛИНА ВОЛНЫ, СМ 4,0 3,0 2,0 1,7

ПОЛЯРИЗОВАННЫЙ ПОТОК $V = T_a^e - T_a^v$ (В АНТЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ), 10^3 К



МАГНИТНОЕ ПОЛЕ, ГАУСС 1000 1500 2000

Рис. 6. Примеры определения величины магнитного поля для локальных источников над пятнами. Шкалы магнитного поля и длин волн линейные. Спектры круговой поляризации показаны в различных масштабах: $\circ$ - масштабный коэффициент 10, Δ - 100, $\square$ - 200.

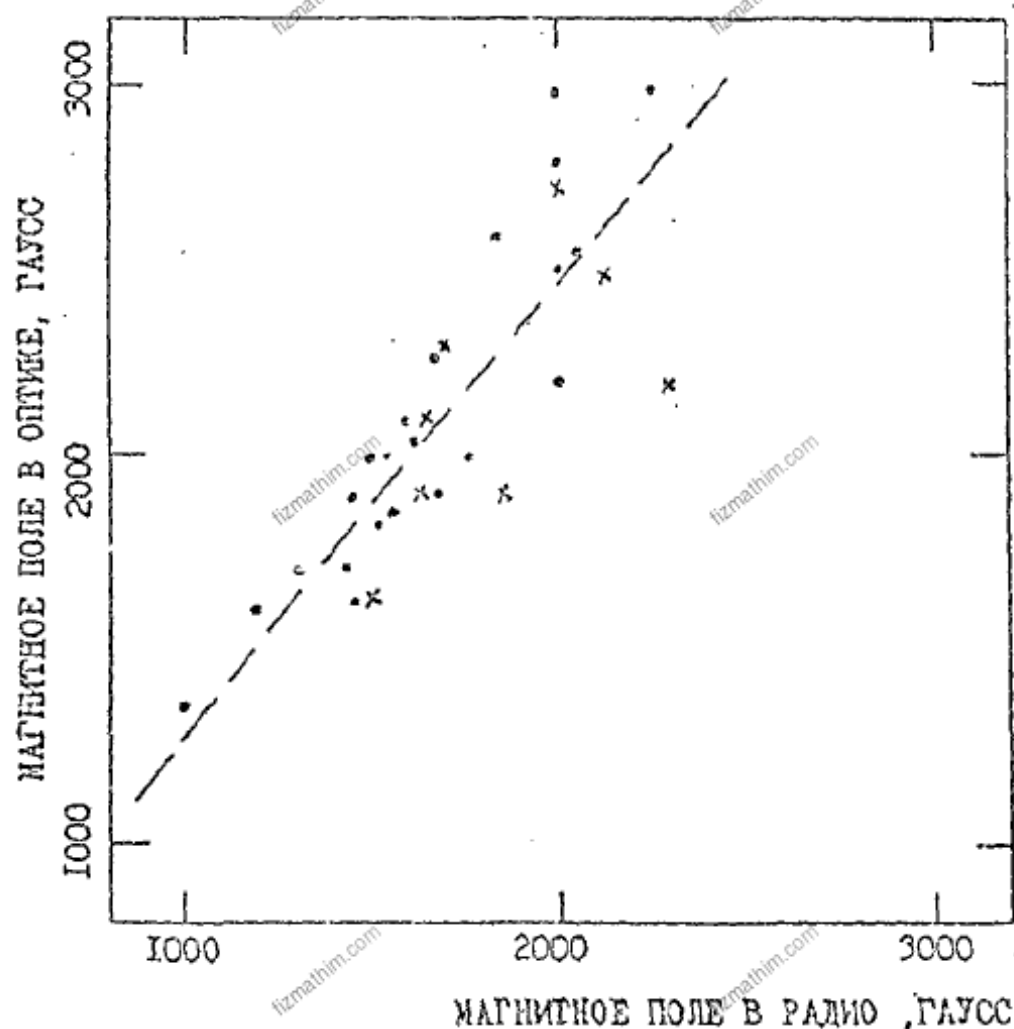


Рис.7. Сравнение радио и оптических измерений величины магнитного поля пятен. Здесь: $\bullet$ - означают северную полярность магнитного поля, $\times$ - южную полярность магнитного поля. Оптические значения магнитных полей взяты из бюллетеня "Солнечные данные". Пунктирная линия определяет линейную регрессию $H_{\text{опт}} = 92 + 1,18 H_{\text{рад}}$, коэффициент корреляции равен $r = 0,81 \pm 0,07$.

значения напряженностей поля, полученные радиоастрономическими методами, хорошо коррелируют с результатами оптических измерений, ведущихся в СССР по программе службы Солнца (см. рис.6 и 7), причем напряженность поля в радиодиапазоне, относящемся к границе короны и хромосферой (так называемой переходной области), всего лишь на 20-30% ниже, чем на уровне фотосферы (37° , 66°). В то же время в ряде наблюдений получены доказательства существования неоднородности в магнитной структуре. Анализ магнитных полей комплекса групп пятен, наблюдавшихся в мае 1980 г. и явившихся объектом ряда исследований в рамках программы ГСМ, показал, что для нескольких исследованных пятен, в которых поля измерялись по зеемановскому расщеплению фотосферных и хромосферных линий, максимальные напряженности достигались не на уровне фотосферы, а где-то в нижней хромосфере, при этом напряженность поля на корональном уровне (РАТАН-600) практически совпадала с фотосферным значением ([16], рис.8) [32°].

В другом случае (апрель 1980 г.) поля на уровне фотосферы имели наибольшие значения, но измерения, сделанные по зеемановскому расщеплению далекой ультрафиолетовой линии иона CIV по данным спутника Solar Maximum Mission, дали значения поля в переходной области почти в два раза ниже радиоастрономических, относящихся к области тех же значений температуры (порядка или более 100 тыс. град.) [17]. Это расхождение удастся разрешить только в рамках существенно неоднородных моделей границы хромосфера-корона в области над пятном [18].

Результаты сопоставления спектральных данных и модельных расчетов для магнитной шкалы высот над пятном дают значения $L_B = - (7.4 \pm 2.3) \cdot 10^3$ км на уровне основания короны (для высот $2 \cdot 10^3$ км над фотосферой), что определяет величину градиента магнитного поля над пятном от 0.1 до 0.4 Гаусс/км [46° , 47°].

Была также обнаружена связь величины значений магнитного поля пятна в основании короны с развитием солнечной активности - всплыванием новых магнитных потоков [19] и возникновением шумовых бурь метрового диапазона [20].

Измерения магнитных полей корональных конденсаций по поляризации их тормозного излучения показали значения полей порядка 20 Гс - близкое к значениям, ожидаемым в приближении

потенциального поля, проэкстраполированного от фотосферных значений [23]. Аналогичные результаты были получены по инверсии знака круговой поляризации Л.И. по диапазону и во времени [2] для высот порядка 10-50 тыс.км над фотосферой.

Наблюдения на РАТАН-600 позволили отождествить, обнаруженные Ugrо S. корональные источники (СММС) в миллиметровом диапазоне волн (располагающиеся на высотах 10^5 км) и получить в сантиметровом диапазоне для них спектр яркостных температур [49*]. При этом было установлено, что их излучение носит тепловой характер, и были сделаны оценки их магнитного поля.

Относительно полное заполнение рабочего диапазона РАТАН-600 (использовалось до 10 приемников в диапазоне 1-30 см) и достаточно длительные серии наблюдений дали возможность провести детальное исследование структуры активной области. Было выделено диффузное образование (гало) входящее практически во все АО, имеющее максимум потока в диапазоне (10-20 см) [21]. Интерпретация этого факта привела к заключению, что в корональных конденсациях имеют место практически постоянно действующие нетепловые процессы, сопровождающиеся ускорением электронов до высоких энергий и возбуждением плазменной турбулентности. В последние годы, наряду с пятенной, флоккулярной компонентами и корональными конденсациями на РАТАН-600 был обнаружена новая компонента - так называемые лейдажские источники [36*, 37*, 38*, 35*]. Эти источники располагаются над нейтральной линией фотосферного магнитного поля, имеют размеры 10-30 угл.сек, обладают аномально большим спектральным индексом и относительно стабильны на протяжении нескольких суток. Яркостные температуры таких источников достигают 10^7 К [22*].

Полулярные источники возникают во вспыечно-активных областях групп пятен (Рис.8), не проявляя, однако, прямой связи с отдельными вспышками. Они свидетельствуют о том, что солнечные вспышки как взрывообразные процессы являются частным случаем общего процесса нетеплового энерговыделения в верхних слоях атмосферы Солнца и должны изучаться как частное проявление этого общего процесса, реализующегося на разных временных масштабах (от миллисекунд до многих суток).

Поскольку РАТАН-600 является преимущественно пассивным

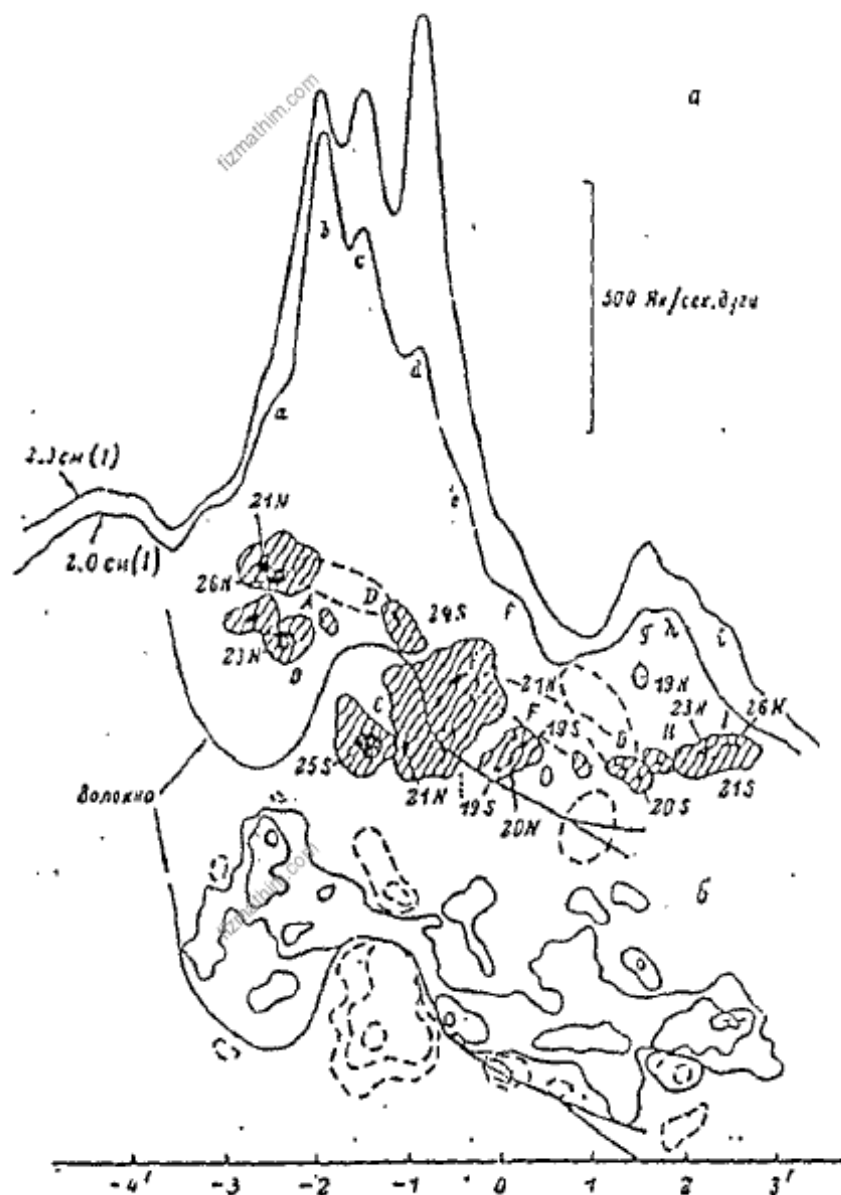


Рис. 8. Пример регистрации активной области AR 3804 15 июля 1982г с полярным источником (d) расположенным над нейтральной линией магнитного поля.

инструментом, программы исследований динамических солнечных процессов на нем обычно не ставятся (в России такие исследования ведутся на ССРТ [42]). Однако, используя длительные ряды наблюдений Солнца на РАТАН-600 оказалось возможным проанализировать также структуру ряда всплесков радиоизлучения Солнца, происходящих в моменты прохождения Солнца через диаграмму направленности, при этом использовались данные регулярных наблюдений на малых радиотелескопах радиоастрономической обсерватории в Тремсдорфе. Анализ этих данных позволили выявить и локализовать области избыточного излучения в активной области при всплесках типа медленный подъем и спад (GRF), рост излучения после всплеска (PBI), предвсплесковое и импульсивное всплесковое излучение [43*, 46*, 47*, 51*, 56*, 57*]. Эти работы выполнялись в кооперации с группой немецких астрофизиков под руководством А. Крюгера.

3. СОЗДАНИЕ ПАНОРАМНОГО АНАЛИЗАТОРА СПЕКТРА (ПАС) ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ СОЛНЦА НА РАТАН-600

3.1 ОСНОВНЫЕ ПРЕДПОСЫЛКИ И РАЗРАБОТКА ПРОЕКТА МОДЕРНИЗАЦИИ РАТАН-600 ДЛЯ РАБОТЫ ПО ПРОГРАММАМ 22 ЦИКЛА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

В конце 80-х годов ряд обсерваторий мира вел подготовку к наблюдениям по крупным международным программам 22-го цикла солнечной активности. Чтобы обеспечить эффективное участие РАТАН-600 в этих программах оказалось необходимым провести модернизацию наблюдательной базы. Опыт участия в международных программах Года Солнечного Максимума указывал на необходимость преодоления ряда ограничений присущие РАТАН-600. В связи с этим в 1988 г. нами были разработаны три основных проекта [21*], которые включали в себя:

1. Полное перекрытие частотного диапазона радиотелескопа (от 30 см до 1 см) с возможностью детального анализа (до $\Delta f \sim 1$ МГц) отдельного участка спектра.

2. Решение проблемы слежения за отдельными образованиями на Солнце с целью анализа динамики структуры активных областей на промежутках времени в несколько часов (ИМАР-32 на облучателе №3 в режиме работы в антенной системе Южный сектор с перископическим

отражателем) в сочетании со спектрально-поляризационным комплексом.

3. Создание радиотелиографа для построения двумерных карт радиоизображения Солнца (с разрешением 10 угл.сек x 15 угл.сек в диапазоне 17 ГГц) работающим в нескольких диапазонах волн одновременно и позволяющим анализировать яркие всплески с временным разрешением несколько мкс.

Эта программа модернизации получила в 1989 г. финансовую поддержку от Президиума АН, и работы были начаты по всем трем проектам. В связи с известными экономическими трудностями в стране финансирование было прекращено, вследствие чего работы по полной реализации проекта были остановлены. Однако нам удалось реализовать часть проекта по перекрытию частотного диапазона от 1 до 18 ГГц с частотным разрешением 5% и быстродействием 1-3 мкс/канал.

3.2 АСТРОФИЗИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ И ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ПАНОРАМНОМУ АНАЛИЗАТОРУ СПЕКТРА ИНТЕНСИВНОСТИ И ПОЛЯРИЗАЦИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СОЛНЦА

Основные, технические требования к аппаратуре вытекают из перечня актуальных астрофизических задач. Они включают в себя сегодня следующее:

поиск циклотронных линий [7] (проблема поставлена В.В.Железняковым и Е.Я.Злотник в 1980г):

- необходимое частотное разрешение - $\Delta f / f_0 = V_e / c \approx 10^{-2}$;
- перекрытие по частотному диапазону 2 - 3 октавы в см и дм диапазоне волн;

анализ спектров радиоизлучения различных локальных источников в активной области (проблема поиска источников генерации энергии, ее сохранения и высвобождения в АО):

- необходимое частотное разрешение - $\Delta f / f_0 = 3 - 5\%$, перекрытие по частотному диапазону (3 - 18 ГГц),
- большой динамический диапазон принимаемых сигналов ≈ 30 дБ;

регистрация всплесков солнечного радиоизлучения (редкое событие при транзитных наблюдениях на прохождение, для регулярных наблюдений необходимо слежение в антенной системе Южный сектор +

перископ):

-большой динамический диапазон ≈ 40 дБ,

-высокое временное разрешение $\approx (3-10)$ мксек/канал,

-перекритие по частотному диапазону (1-18 ГГц),

-совмещение входных облучателей в едином фокусе;

регистрация слабых объектов (корональных дыр, радиогрануляция, волокна, полости волокон, протуберанцы, флоккулы, полярные факелы и др.);

-максимальная чувствительность по каналам интенсивности и поляризации,

-перекритие по частотному диапазону (1-30 ГГц),

изучение магнитосферы активных областей (измерение магнитных полей флоккул, магнитных полей в короне над пятнами, измерения по эффекту смены знака круговой поляризации в области квазипоперечных магнитных полей и построение трехмерной картины АО):

-частотное разрешение $\leq 5\%$,

-перекритие по диапазону $\approx (1-30)$ ГГц),

3.3 ОБЩАЯ СХЕМА РАБОТЫ ПАС

На Рис.9 представлена общая схема ПАС для одного из диапазонов. Схема состоит из системы входных облучателей (1), широкополосных трехпозиционных переключателей входных сигналов (2), широкополосных СВЧ трактов (стеблей) на несколько диапазонов (3), фильтровых микроволновых мультиплексоров (4) с детекторными секциями, низкочастотного аналогового выходного устройства (5) [8*], цифровой многоканальной системы сбора информации и системы компьютерного управления параметрами ПАС (6), а также периферийного компьютера (7) с необходимой периферией.

В основе работы ПАС лежит использование совмещенных входных облучателей, имеющих минимально возможное (в идеале до одного) число фазовых центров для всех принимаемых частот. В зависимости от положения переключателя (2) каждый входной облучатель принимает либо правую круговую поляризацию (R), либо левую (L), либо неполяризованное излучение эталонной нагрузки эквивалента (E).

В дальнейшем сигнал, пропорциональный разности интенсивностей каждой из круговых поляризаций и эквивалента, в определенной

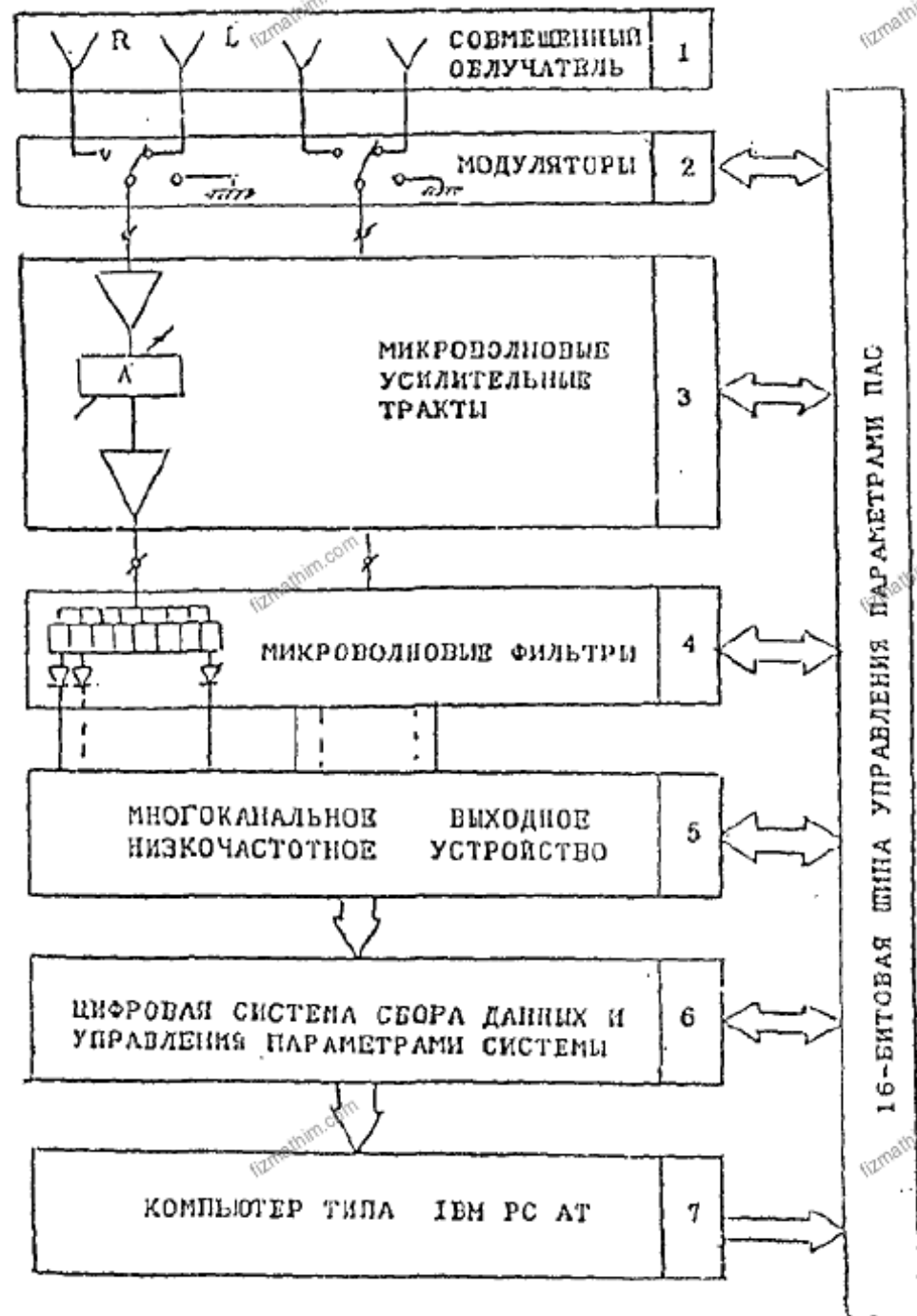


Рис. 9. Блок-схема панорамного анализатора спектра

последовательности после усиления, фильтрации, детектирования, проходит в выходное низкочастотное устройство, предназначенное для усиления низкочастотной огибающей сигнала, его фильтрации за время интегрирования $\tau < 1/2 F_{mod}$. В этом устройстве имеется также схема выборки и хранения сигнала, обеспечивающая возможность многоканального считывания сигнала с помощью быстродействующего коммутатора цифровой системы (6) сбора информации. Далее сигналы подвергаются преобразованию в 10 разрядный цифровой код с помощью АЦП с быстродействием 25 микросек/преобразование. Конструктивно совместно с системой сбора реализована схема управления параметрами ПАС от компьютера IBM PC AT. Управление осуществляется 16-разрядным цифровым кодом и схемами цифроаналогового преобразования (ЦАП), расположенными в различных узлах ПАС для управления калибровками, усилением по низкой частоте, динамическим диапазоном по СВЧ, постоянной интегрирования и др.

Важной особенностью схемы ПАС является использование метода фазового кодирования входных сигналов, позволившего сократить вдвое число каналов в низкочастотном выходном устройстве (5). В таком устройстве обычно реализуются функции регулируемого низкочастотного усиления, узкополосной фильтрации шумов на частоте модуляции, синхронного детектирования, интегрирования за постоянную времени и согласование со схемой сбора данных. При необходимости регистрации двух параметров радионизлучения (в случае солнечных наблюдений параметры Стокса I и V) обычно применяют две частоты модуляции сигналов по каждому параметру, что влечет использование для каждого частотного канала двух каналов низкочастотного выходного устройства. Применение метода фазового кодирования позволяет использовать лишь один канал низкочастотного выходного устройства для выполнения функций регулирования низкочастотного усиления и узкополосной фильтрации шумов, а остальные две функции (синхронного детектирования и интегрирования с нужной постоянной времени) и дополнительную функцию (фазового декодирования) возложить на цифровую систему сбора данных на базе персонального компьютера.

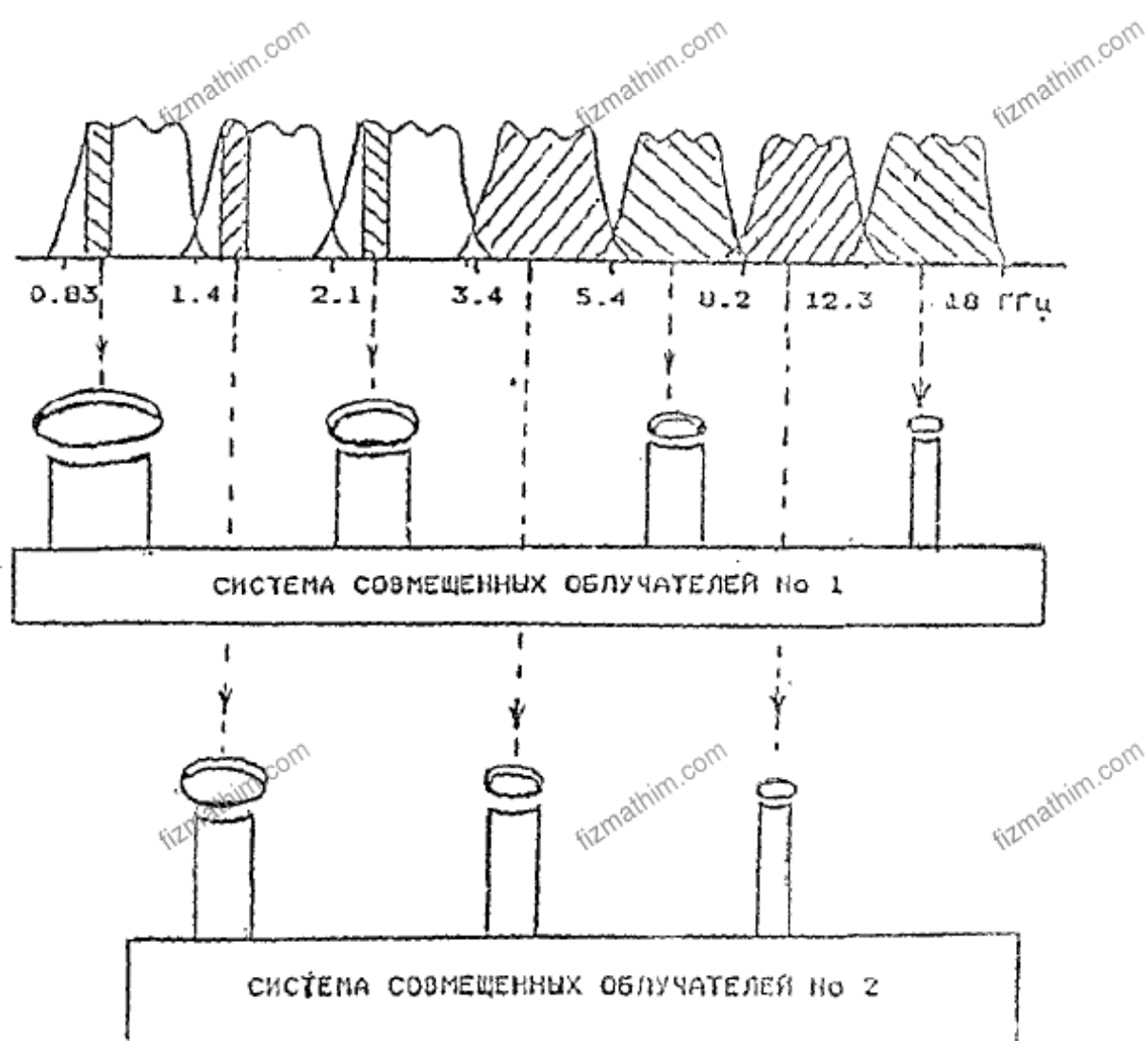


Рис.10 Перекрытие частотного диапазона с помощью рапорованного анализатора спектра (частотные характеристики и изображения приемных трактов схематические)

3.4 МНОГОВОЛНОВЫЙ СОВМЕЩЕННЫЙ ОБЛУЧАТЕЛЬ

Созданная система совмещенных входных облучателей является результатом многолетнего творческого содружества между САО и Ленинградским политехническим институт (сейчас политехнический университет) (доцент В.Н.Диксий) и очередным шагом в развитии идеологии, описанной в работе [4*]. Такого типа совмещенные облучатели были реализованы сначала в дециметровом диапазоне на РАТАН-600, затем в связи с наблюдением солнечного затмения и на сантиметровых волнах [10*]. Реализована оригинальная конструкция [12*], состоящая из двух отдельных совмещенных облучателей, каждый из которых представляет собой систему из кольцевых излучателей, вложенных друг в друга. Частотный диапазон, перекрываемый каждым типом облучателя, показан на Рис.10. А на Рис.11 приведен чертеж одной из применяемых систем на два диапазона. В настоящее время достигнутый уровень совмещения - это два фазовых центра, расположенных на расстоянии 55 мм от фокуса радиотелескопа для всего перекрываемого с помощью ПАС диапазона от 3,5 ГГц до 18 ГГц и трех дополнительно подключенных диапазонов на волны 12 см, 20 см и 30 см. Возникающие из-за выноса из фокуса небольшие aberrации могут быть скорректированы расчетным способом.

3.5 СИСТЕМА СБОРА ИНФОРМАЦИИ НА БАЗЕ IBM PC AT

Основу цифровой части ПАС составляет персональный компьютер типа IBM PC AT-286, к которому подключен ряд дополнительных периферийных устройств. Два жестких диска емкостью по 42 Мбайт используются для высокоскоростной записи данных и позволяют осуществлять непрерывную запись информации в реальном времени со скоростью 25 мбайт/с. Для архивизации полученных данных используется стример со сменными кассетами емкостью 60 Мбайт. Для сбора данных и управления параметрами аппаратуры ПАС разработана многоканальная аналого-цифровая система ввода-вывода данных. Устройство размещено на одной плате, соответствующей стандарту для плат расширения IBC IBM PC XT/AT, и вставляется в стандартный слот расширения внутри корпуса компьютера. Питание платы осуществляется от источников питания ПК.

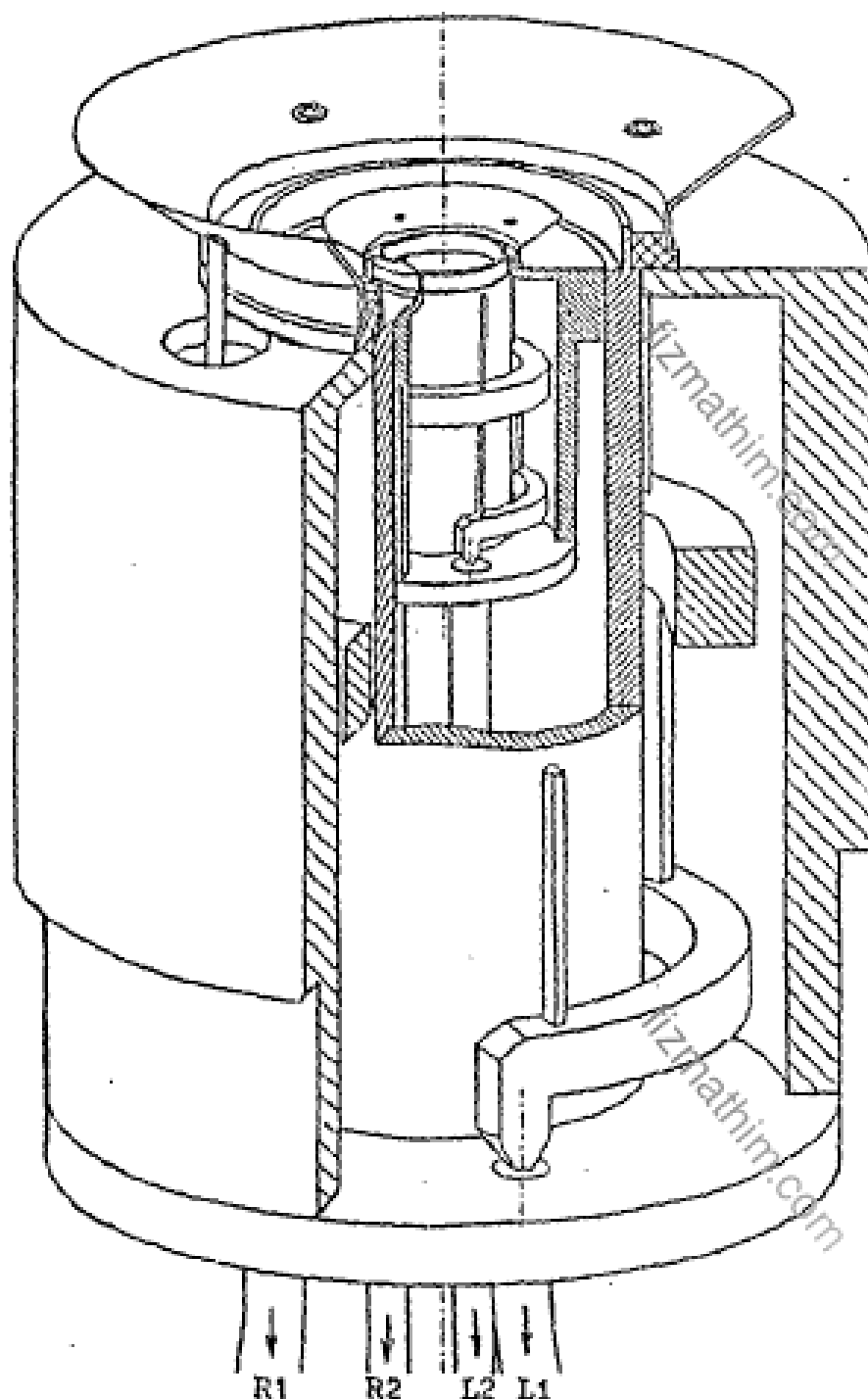


Рис. 11 Пример конструкции облучателя для двух диапазонов.

Основные технические характеристики устройства.

(разработчик С.В. Вострулин)

- 10-разрядный АЦП со временем преобразования 25 мкс,
- 64 аналоговых канала ввода данных в диапазоне (0-5) вольт, (8 восьмиканальных коммутатора),
- 24 цифровые программируемые линии ввода-вывода,
- работа в режиме программных запросов или в режиме прерываний.

Программное обеспечение системы сбора данных и управления параметрами ПАС разработано В.В. Ахлюмовой-Максимовой (ГАО РАН).

Основные функции программного обеспечения следующие:

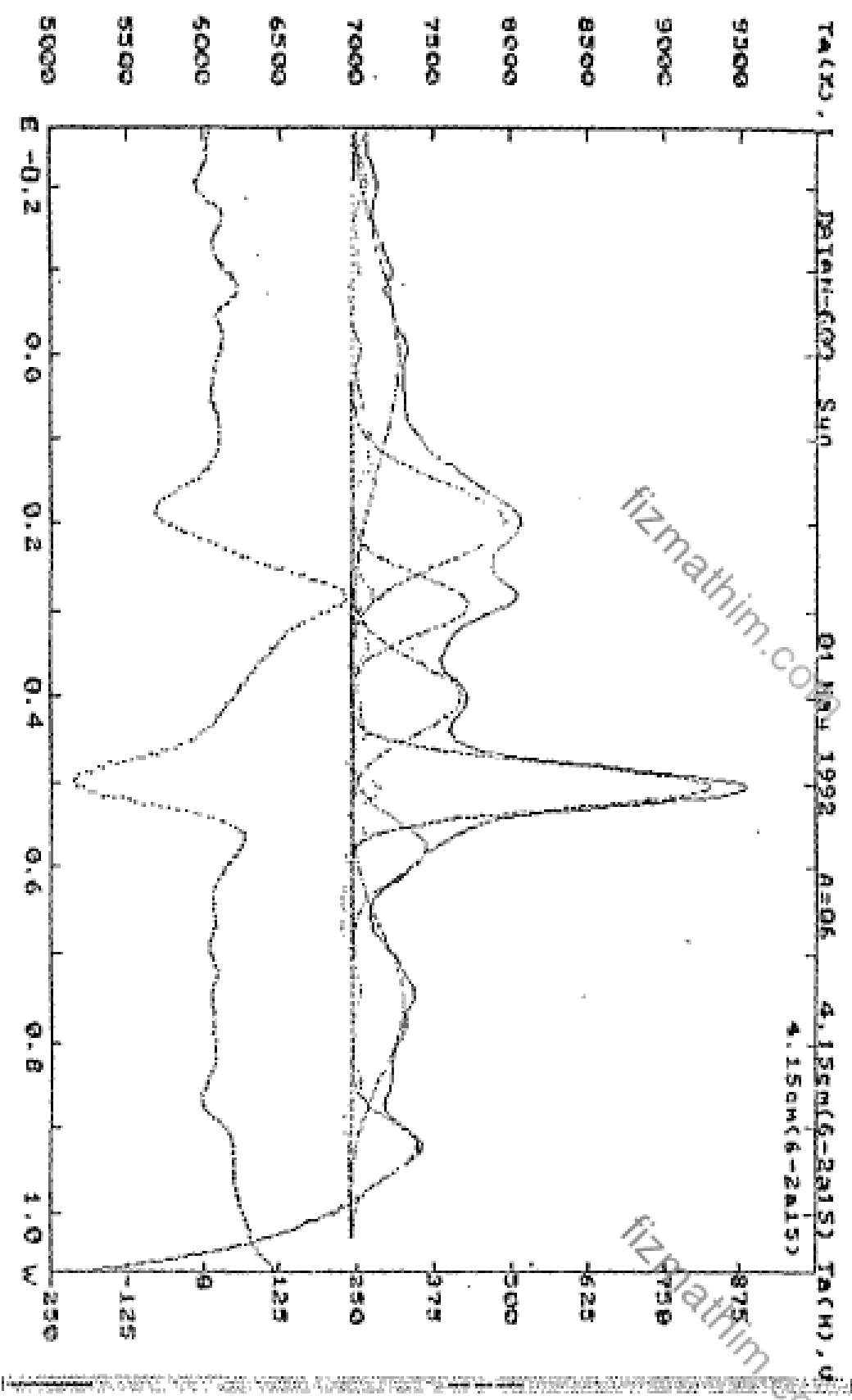
- управление считыванием информации с многоканального выходного НЧ устройства и быстродействующего аналого-цифрового преобразователя,
- реализация записи многоканальной информации на магнитный носитель (жесткий диск),
- осуществление поканальной фазовой декодировки и представление текущей информации на дисплее,
- реализация оперативного изменения коэффициента усреднения цифровой регистрации (аналог постоянной времени),
- оперативный анализ текущей информации и выработка команд управления параметрами ПАС (коэффициентом усиления по НЧ, динамическим диапазоном по СВЧ, изменением постоянной времени, включением и выключением калибровок по правому и левому поляризационным каналам),
- реализация тестовых операций готовности аппаратуры,
- различные сервисные программы.

3.6 СИСТЕМА ОБРАБОТКИ НАБЛЮДЕНИЙ СОЛНЦА, ВЫПОЛНЕННЫХ НА ПАС РАТАН-600 (разработчик С.В. Цветков ГАО РАН)

Комплекс программного обеспечения PIRAT реализован в программно-аппаратной среде, совместимой с IBM PC компьютерами.

Основными функциями его являются:

- создание на основе первичных наблюдательных данных рабочего Архива данных радиоастрономических наблюдений,
- отображение кривых интенсивности (параметр Стокса I) и круговой поляризации (параметр Стокса V), или их фрагментов, в произвольных сочетаниях и масштабах на EGA (640x350) и VGA (640x480)-совместимых



MO=0.5026N F=2.402 s/c Th=3.011e+005 K D=43.47 arc.sec 5 gauss used

Рис.12 Пример работы программы обработки наблюдений на ЛАС. Проведен гаусс-анализ зарегистрированной интенсивности (верхняя кривая) и поляризации (нижняя кривая).

мониторах в I6-цветном режиме.

- исправление различных нефатальных дефектов записи, например, выбросов локаторов или помех,
- коррекцию привязки оси времени и центровка записи по ее производной на коротковолновом краю ПАС, где влияние активности Солнца достаточно мало,
- оценку ряда параметров ЛМ радиоизлучения АО Солнца, таких как одномерная координата, величина потока радиоизлучения, антенная и яркостная температуры, размер источника, с использованием в интерактивном режиме метода Гаусс-анализа для разделения радиоизлучения АО на компоненты, соответствующие отдельным ЛМ радиоизлучения (см. Рис.12),
- получение многоцветной твердой копии в произвольном масштабе на всех основных этапах работы системы на HP-совместимых плоттерах.

3.7 ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПАС

Перечень частотных каналов ПАС и соответствующее пространственное разрешение в режиме наблюдений на Южном секторе совместно с перископическим отражателем приведены в Табл.3. Перекрытие частотного диапазона радиотелескопа схематически приведено на Рис.10.

ВРЕМЕННОЕ РАЗРЕШЕНИЕ.....	I-3 мкс/канал
ДИНАМИЧЕСКИЙ ДИАПАЗОН.....	> 20дБ (без управления по СВЧ) > 50дБ (с управлением по СВЧ)
РАЗВЯЗКА (между каналами).....	> 17дБ
ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ПО ПОТОКУ.....	0.1% от уровня спокойного Солнца (для полосы 200МГц и пост.времени 1 с)
ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ПО V	(0.5-2)% (для степени круго- вой поляризации)
ДЛИТЕЛЬНОСТЬ НАБЛЮДЕНИЙ.....	обычно один скан /день (для специальных программ 4 часа в день с 15 мин интервалом)

Табл. 3. РЕЗУЛЬТАТЫ КАНАЛОВ НАХОЖДЕНИЯ АНАЛИЗАТОРА СИМЕТРИИ
 ЧАСТОТА ЛИНЕЙНАЯ БОЛШИ ИСТОПАНЧЕНННОЕ ПАРЕНТЕ

LTU CM E-W(arcmin) N-S(arcmin)

1.00	30.0	270.0	187
1.50	20.0	180.0	125
2.50	12.0	108.0	75
3.65	8.21	75.0	52
3.85	7.79	70.0	48
4.14	7.24	65.0	45
4.37	6.86	61.0	42
4.62	6.49	58.0	40
4.92	6.10	55.0	38
5.14	5.83	52.5	36
5.37	5.58	50.0	34
5.69	5.26	47.5	33
6.00	5.00	45.0	31
6.34	4.73	42.6	30
6.52	4.60	42.0	29
6.87	4.36	40.0	27
7.23	4.15	37.0	26
7.45	4.02	36.0	25
7.77	3.86	34.0	24
8.20	3.65	33.0	23
8.70	3.45	31.0	21
9.80	3.22	29.0	20
9.70	3.10	28.0	19
10.20	2.94	26.5	18
10.70	2.80	25.0	17
11.20	2.68	24.0	17
11.70	2.56	23.0	16
12.30	2.40	21.6	15
12.90	2.30	20.7	14
13.55	2.20	20.0	14
14.25	2.10	19.0	12
15.00	2.00	18.0	12
15.80	1.90	17.1	12
16.60	1.80	16.2	11
17.50	1.71	15.4	10

4. ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИИ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЦА С ПОМОЩЬЮ ПАС РАТАН-600

4.1 ПРИМЕРЫ НАБЛЮДЕНИИ ТОНКОЙ СТРУКТУРЫ СПЕКТРА В РАДИОИЗЛУЧЕНИИ ЛОКАЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ

Наблюдения на Панорамном анализаторе спектра начались на Южном секторе РАТАН-600 во второй половине декабря 1991 г. и с тех пор проводятся регулярно. Накоплен значительный наблюдательный материал. За этот период РАТАН-600 принимал участие в 5 международных наблюдательных программах (MAX'91, STEP, FLARES 22) с участием инструментов VLA, OWRO (США), японского спутника YOHKOH и многих других обсерваторий мира. Часть наблюдательного материала обрабатывается, сопоставляется с данными других инструментов и является основой будущего цикла работ совместно с учеными Тафтского университета (США) K.R.Lang и R.F.Willson по изучению магнитосфер активных областей [29*].

Сейчас мы иллюстрируем пример измерения магнитных полей пятен (в короне), используя наблюдения, выполненные на РАТАН-600 с панорамным анализатором спектра. На Рис.13 показаны наблюдения на 8 волнах в диапазоне волн от 1.8 см до 3.2 см, сделанные 10 января 1992 г. На поляризационных сканах можно идентифицировать до 14 источников, связанных с пятнами. Лишь один из них (g) регистрируется на волне 1.8 см, при этом его корональное поле превышает 1800 гаусс. Для остальных источников поляризованное излучение начинается на более длинных волнах в наблюдаемом диапазоне волн. Знак поляризации, как и ожидается, соответствует изгибу необыкновенной волны. Обычно практически все видимые на диске Солнца пятна регистрируются на спектральных поляризационных кривых. Измерения магнитных полей пятен, связанных с локальными источниками, приведены в Табл.4. В ней в первом столбце обозначения ЛМ, во-втором — номер группы пятен согласно бюллетеню "Солнечные Данные". Далее $B_{\text{опт}}$ и $B_{\text{рад}}$ — измерения магнитных полей в оптике и радио, $\lambda_{\text{крит}}$ — предельная длина волны, на которой начинается циклотронное излучение, γ — отношение величин радио и оптических магнитных полей (средняя величина $\gamma=0.78$).



Рис. 13. Радиосканы Солнца (параметр Стокса V), сделанные с ножевой диаграммой радиотелескопа РАТАН-600 10 января 1992г. Вверху приведена оптическая карта с нанесенными значениями фотосферных магнитных полей. Практически каждое пятно имеет соответствующий локальный источник. Магнитные поля в радиодиапазоне определяются по началу появления излучения в частотном спектре.

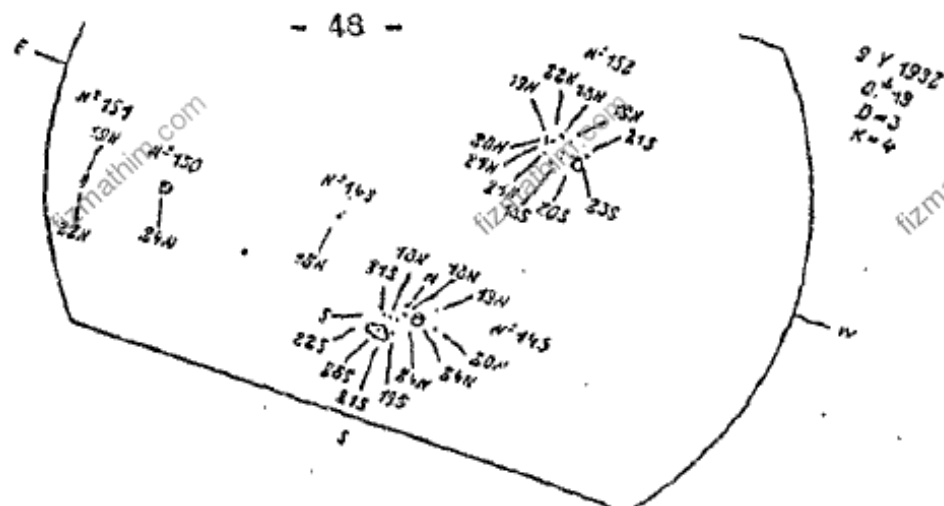
4.2 ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА НЕОДНОКРАТНОЙ СМЕНЫ ЗНАКА КРУГОВОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ

Явление смены знака поляризации обычно обусловлено распространением электромагнитной волны в квазипоперечном магнитном поле в солнечной короне, где знак продольной компоненты магнитного поля меняется на противоположный. Оно давно привлекает внимание исследователей [2, 28, 30] и имеет хорошо разработанную теорию [24, 25, 34], согласно которой степень круговой поляризации (первоначально принимаемая равной $P = -1$) преобразуется в QT - области (см. Железняков [24]) согласно следующему выражению:

$$P = 1 - 2 \exp(-2\delta_0).$$

где $\delta_0 \approx 10^{-25} \text{ Н В}^3 \text{ Л } \lambda^4$.

Из приведенных формул видна сильная зависимость эффекта от длины волны и величины магнитного поля (поскольку существует экспоненциальная зависимость P от δ_0). До сих пор, однако, наблюдения обнаруживали лишь однократную смену знака круговой поляризации в микроволновом диапазоне [2]. Новые наблюдения активных областей, выполненные на РАТАН-600 на панорамном анализаторе спектра с разрешением 5%, часто обнаруживают неоднократную смену знака круговой поляризации по диапазону (Рис. 14-1, 14-2, 14-3, 14-4). Локальный источник связанный с биполярной группой солнечных пятен No.145 СД, 1992, как отмечалось в [42] для биполярных структур, показывает инверсию круговой поляризации вблизи времени прохождения АО центрального солнечного меридиана (9.05.1992г.). Благодаря высокому угловому и спектральному разрешению удалось зарегистрировать одновременно как неоднократную смену поляризации ядра ЛИ над головным пятном группы (в диапазоне от 3.65 см до 4.73 см), так и инверсию поляризации ядра ЛИ над хвостовым пятном (3.65 см - 3.86 см). Инверсия поляризации биполярной группы пятен объясняется (на это указывают модельные расчеты Б.И.Рябова) пересечением распространения излучения QT - области в короне формируемой магнитными полями солнечных пятен. Особенностью анализируемого материала является неоднократная смена



T_{ant} (K). I RATAN-600 Sun 09 May 1992 $\lambda=0.5$

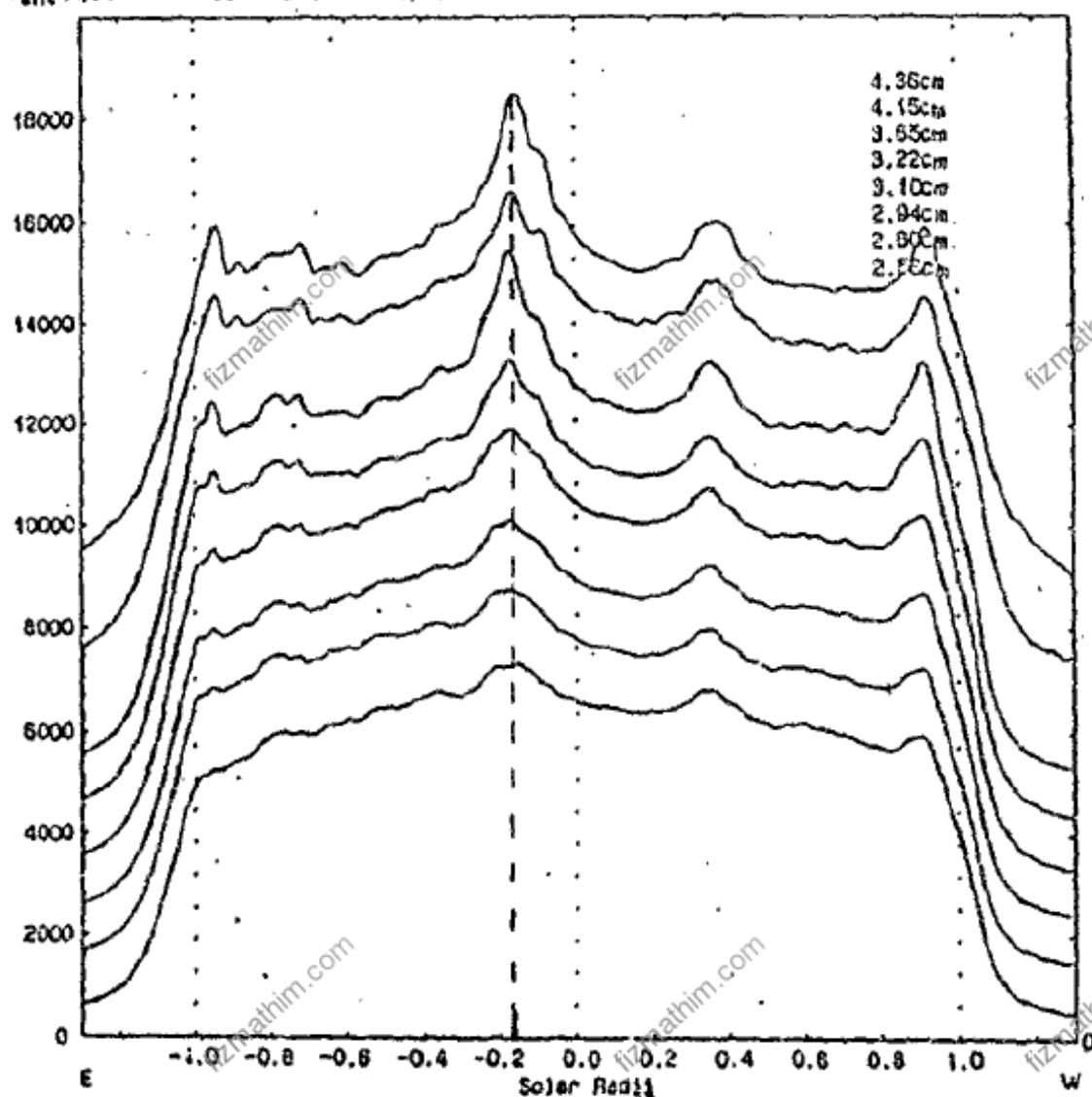
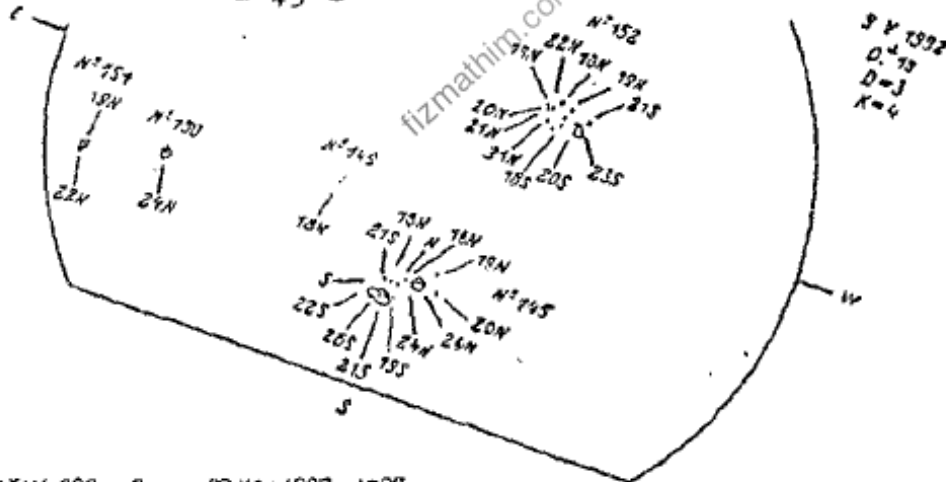


Рис.14-І Пример регистрации скана Солнца 9 мая 1992 г. на RATAN-600 на ряде волн в диапазоне (от 2.56 см до 4.36 см) в каналах интенсивности.



Y_{ent} (K), V. RAYAN-600 Sun 03 May 1992 A*03

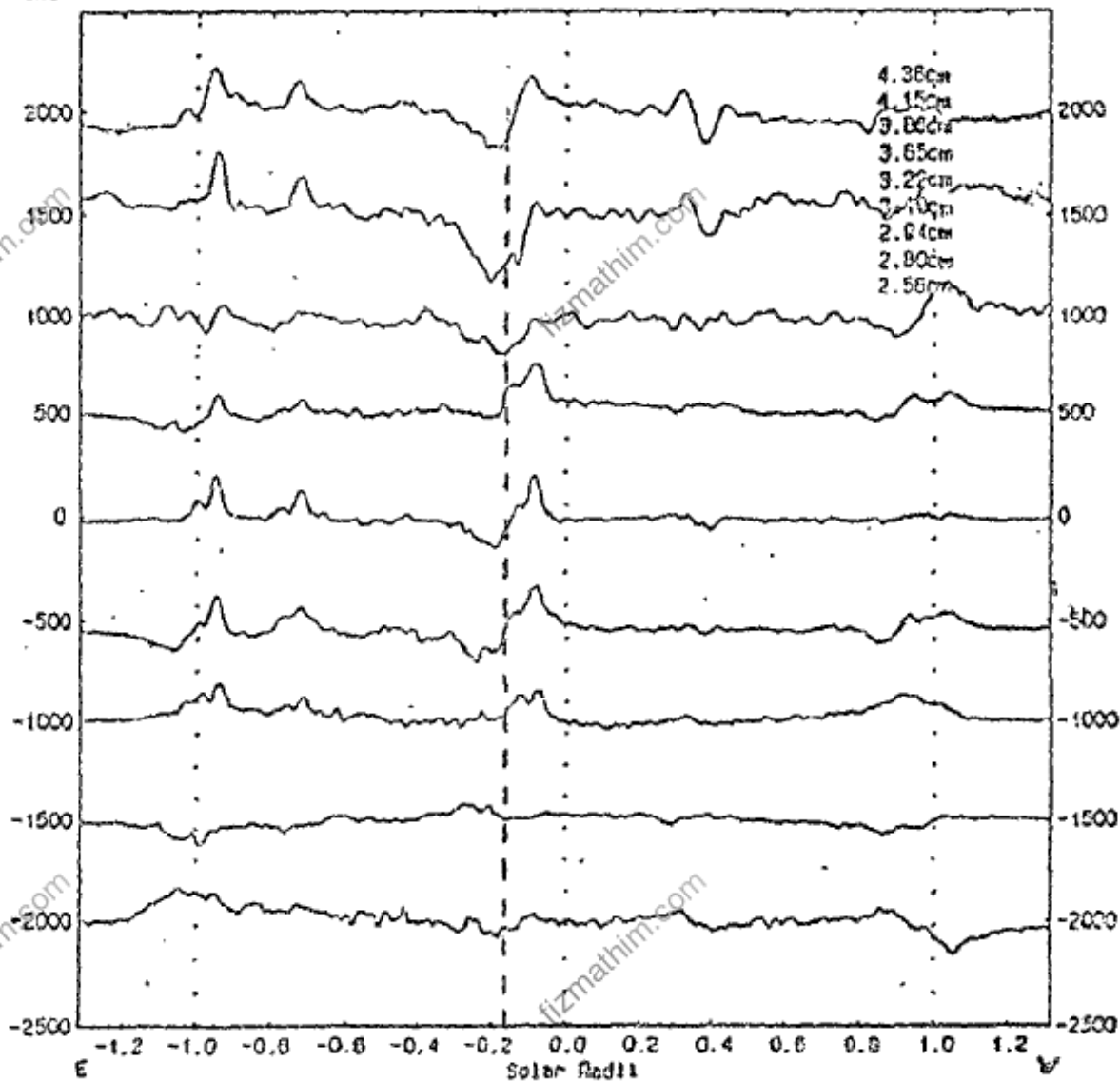
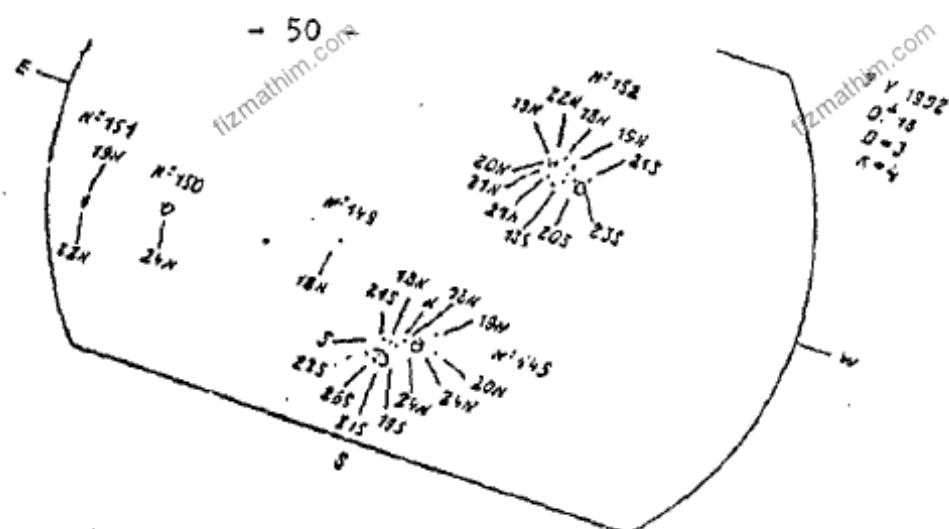


Рис.14-2 То же, но для каналов круговой поляризации параметр Стокса V.



Int (K).I. RATAN-600 Sun 09 May 1992 A:06

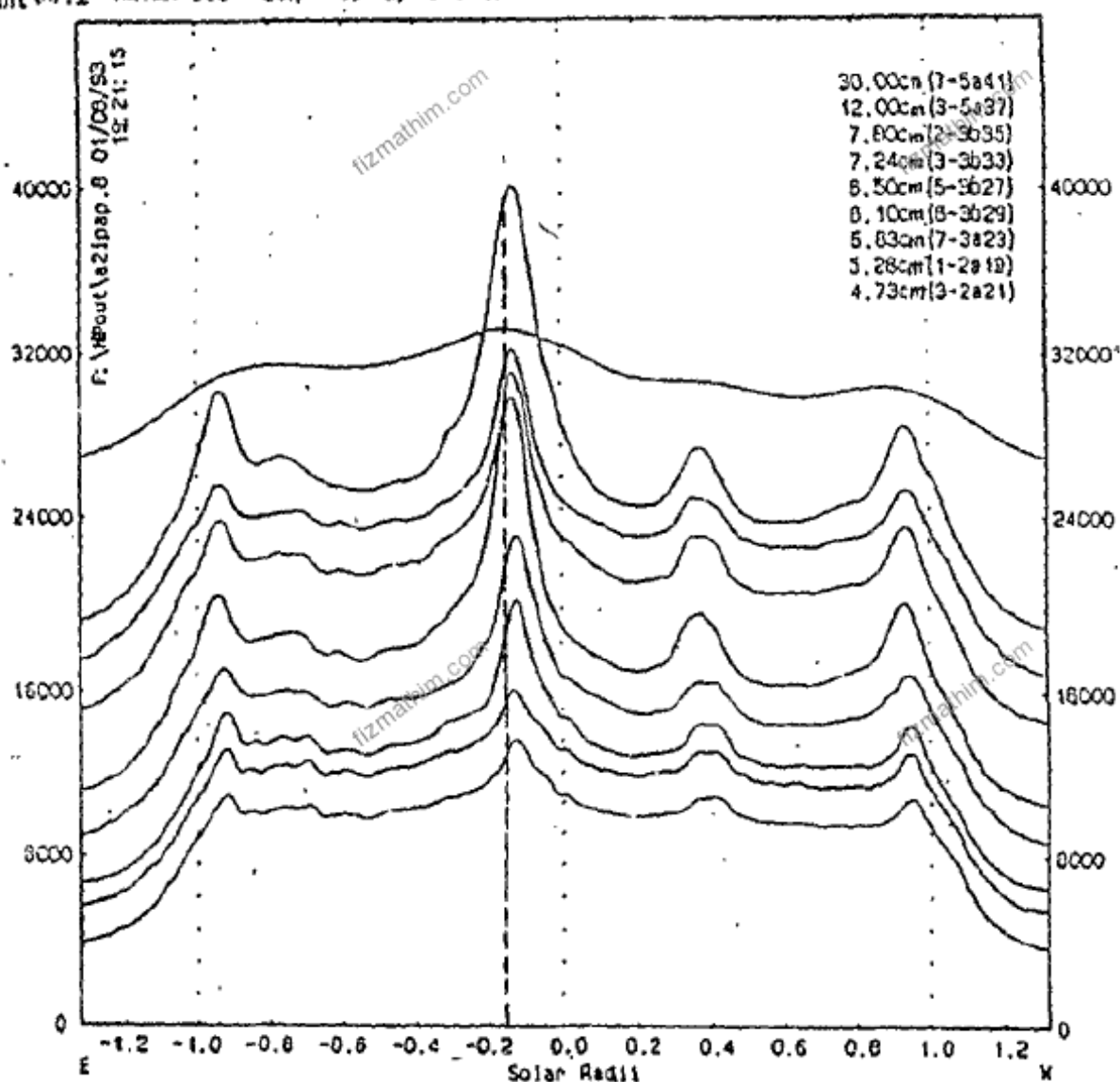
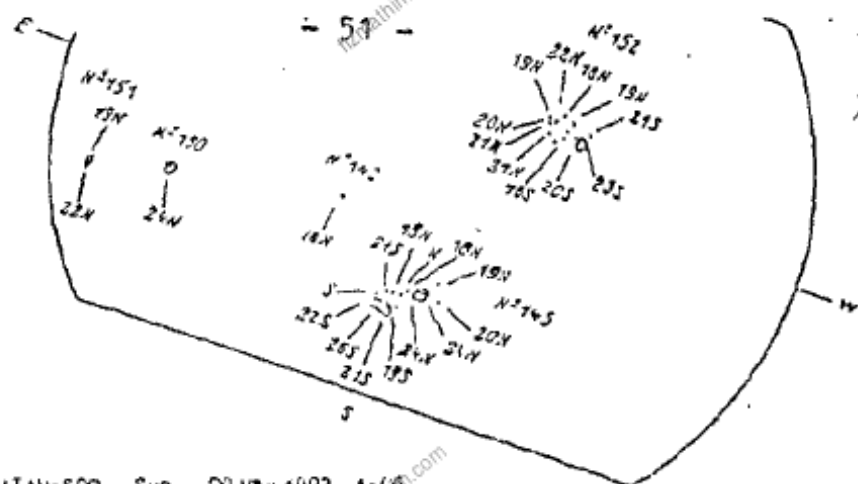


Рис.14-3 Записи Солнца в каналах интенсивности для волн от 4.6 см до 30 см.



9 May 1992
04:18
D=3
N=6

Int (K), V RATAN-800 Sun 09 May 1992 A-06

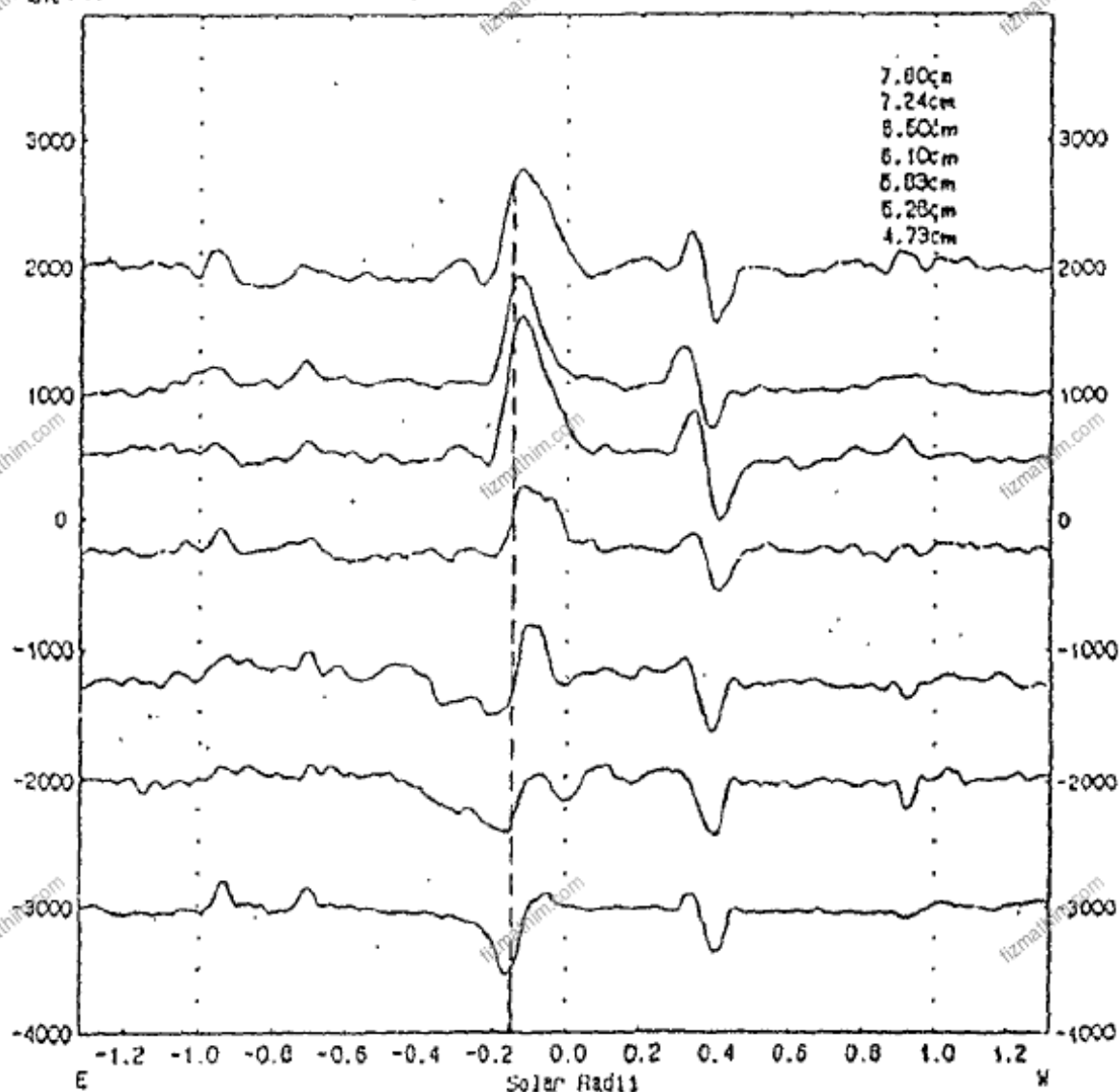


Рис.14-4 Записи Солнца в каналах круговой поляризации (параметр Стокса V) для длин волн от 4.73 до 7.8 см.

поляризации излучения одного из ядер ЛМ на близких волнах. Это говорит о том, что поперечные магнитные поля со средней напряженностью ~ 10 Гс неоднократно встречаются в короне на пути распространения излучения.

Из модельных расчетов [28*] также следует, что эффект второй и последующих смен знака поляризации часто связан с влиянием поперечных полей в короне определяемых межэкваториальными магнитными арками, соединяющими области крупномасштабных флюккульных полей, расположенных в разных полушариях Солнца. Просмотр ряда записей показал, что явление неоднократной смены знака поляризации наблюдается достаточно часто: из обработанных 15 дней наблюдений отмечено три таких случая, и, как показывают модельные расчеты, они несут информацию о величинах магнитных полей на нескольких уровнях солнечной атмосферы. Из модельного анализа также следует, что наблюдения эффекта инверсии поляризации могут быть использованы для исследования магнитной структуры в окрестности особых точек - нейтральных токовых слоев в активной области [33].

4.3 АНАЛИЗ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ПЯТЕН В КОРОНЕ

Ранее в работе [34] нами было показано, что существует хорошая корреляция радио с оптическими (фотосферными) магнитными полями, при этом магнитные поля, измеренные по радионаблюдениям, слабее оптических на 20 %.

Как показал опыт дальнейших наблюдений [32, 33, 37]. $\gamma = H_{\text{rad}}/H_{\text{opt}} = 0.8$ хорошо подтверждается во многих случаях, особенно для четко изолированных пятен, в которых предполагается характерная для униполярного пятна структура поля и солнечной атмосферы. Напротив, в случаях, связанных с появлением нового магнитного потока в группе пятен или при наличии в активной области "полюлярного источника", что, возможно, связано с перестройкой магнитосферы, наблюдаются отклонения величины $H_{\text{rad}}/H_{\text{opt}}$ как в сторону больших [17], так и меньших значений [18], и получены указания на то, что этот критерий может служить важным индикатором последующего развития данной активной области.

Уже первые наблюдения на ПАС показали наличие тонких спектральных неоднородностей в радиоизлучении отдельных солнечных

образований. Возможно, что станут доступны подробным исследованиям с высоким пространственным разрешением также структур, отмеченные ранее группой М.М. Кобринца по наблюдениям с низким пространственным разрешением [21]. Отмечаются также детали, требующие более высокого (чем 5%) частотного разрешения. Значительно повышена точность ранее разработанных методов измерения магнитных полей в локальных источниках активной области по их спектрально-поляризационным характеристикам. Уже сейчас можно отметить, что наблюдения на РАТАН-600 с новым аппаратным комплексом открывают широкие возможности для детальных исследований и построения трехмерной структуры магнитосфер активных областей, поскольку становятся доступными спектральным измерениям многие детали активной области и накоплен значительный опыт их исследований. К ним относятся : флюккулы [30*], волокна, полости волокон [39], протуберанцы [31*], корональные дыры [5], ядерная компонента локальных источников [34*], гало активной области [21], "пекулярные" источники [37*], области с поперечным магнитным полем (QT-области) [2], полярные факелы [54*], петли и аркады петель [36*].

Результаты, представленные выше, показывают, что новые спектральные методы (ПАС), используемые для солнечных наблюдений на радиотелескопе РАТАН-600, реально позволяют достичь высокой точности в измерениях магнитных полей пятен. Полученные по радионаблюдениям магнитные поля являются новой характеристикой солнечных пятен и измеряемые в этом случае напряженности поля относятся к области перехода между короной и хромосферой, причем измерения величины в этой области представляют максимальное значение магнитного поля. Отношение значений поля, полученным радио и оптическим методами является параметром, содержащим информацию о распределении магнитного поля и температуры в солнечной атмосфере над пятном. Анализ таких измерений может дать дополнительную информацию также о потоке энергии в магнитных трубках пятен. Необходимы дальнейшие наблюдения с использованием этого метода, особенно с одновременными оптическими измерениями на различных уровнях фотосферы и хромосферы.

Наибольший интерес, однако, имеют измерения магнитных полей в активных областях с использованием одновременно всеми тремя

методами источников тормозного механизма, циклотронного излучения и по распространению радиоизлучения в QT-областях в комбинации с высоким пространственным разрешением и картографированием с помощью таких инструментов, как VLA. Также представляется реальная возможность исследования детальной структуры магнитосферы активной области, особенно, если они сочетаются также с наблюдениями в ультрафиолете и в рентгене. Такие наблюдения возможны в рамках международных кооперативных программ.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА ТОНКИХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ И СПЕКТРАЛЬНЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ КООПЕРАТИВНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ СОЛНЦА НА RATAN-600 И БОЛЬШИХ АНТЕННАХ АПЕРТУРНОГО СИНТЕЗА VLA, WSRT

5.1 RATAN-600, VLA, WSRT КАК ВЗАИМНО ДОПОЛНЯЮЩИЕ ИНСТРУМЕНТЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СОЛНЦА.

Изучение радиоизлучения Солнца в широком (перекрывающем несколько октав) диапазоне длин волн представляет собой большую ценность для диагностики солнечной плазмы для всех типов ее активности.

Для адекватного описания физических процессов на Солнце необходимо сочетание многих параметров приемной системы:

- высокого пространственного разрешения,
- хорошего заполнения UV-плоскости пространственных частот,
- полного перекрытия частотного диапазона и спектрального анализа с разными уровнями разрешения,
- временного анализа с различным разрешением от 1-3 мкс до нескольких секунд,
- полного анализа поляризации с высокой чувствительностью к слабо поляризованным сигналам.

В реальных наблюдениях существует много ограничений для сочетания всех перечисленных выше параметров в одном инструменте.

Радиотелескоп RATAN-600 способен обеспечить решение следующих из нижеперечисленных проблем:

- хорошее перекрытие широкого диапазона длин волн (от 0.8 см до 30 см),
- хорошая точность поляризационных измерений для параметра Стокса

V (до 0.5 % и выше),

- большой динамический диапазон (более 20 дБ),
- хорошее перекрытие UV-плоскости (в режиме солнечных наблюдений на Южном секторе с перископом апертура радиотелескопа представляет собой зеркало с размерами 200 м x 5,5 м),
- высокая чувствительность по потоку (лучше чем 0.01 % от уровня спокойного Солнца), что очень важно для изучения слабых активных объектов.

- В то же время инструменту присущи и существенные ограничения:
- низкое временное разрешение (обычно наблюдения раз в день в местный полдень, иногда возможны наблюдения в течение 4 часов с интервалом до 8-15 минут),
 - отсутствие двумерного картографирования,
 - низкое пространственное разрешение на дециметровых волнах.

Нами [15] предложен для реализации ряд проектов, которые могли бы в значительной степени устранить эти ограничения.

Однако, наиболее эффективный путь в настоящее время — это проведение кооперативных наблюдений с помощью различных инструментов одних и тех же активных областей (и сопоставление затем их результатов). Такая кооперация с крупнейшим телескопом VLA (очень большая антенная решетка) была начата в 1982 г. как развитие исследований по международной программе ICM (Года Солнечного Максимума).

В этих наблюдениях были использованы основные достоинства VLA: высокое пространственное разрешение (1-10 угловых секунд), двумерное картографирование и возможность слежения за объектом, а его недостатки, такие как: отсутствие сплошного спектрального перекрытия, нечувствительность к протяженным источникам, низкая чувствительность по поляризации — были компенсированы данными, полученными на RATAN-600.

5.2 РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ ПО ПРОГРАММЕ "ИЮЛЬ 1982"

Целью наблюдений было изучение структуры активных областей на Солнце. Были проведены совместные наблюдения активной области AR 3084 в течение нескольких дней в середине июля 1982 г. На RATAN-600 наблюдения проводились на волнах 2,0 см, 2.3 см, 2.7 см,

3.2 см, 4.0 см, 13.0 см, 21.0 см и 30.0 см с разрешением $18'' \times 12.5'$ для волны 2.0 см. В течение дня проводились неоднократные наблюдения в пяти различных азимутах. VLA работал в диапазоне 20 см с разрешением до $1''$. Для спокойных образований были синтезированы карты полной интенсивности круговой поляризации V, а для переменных событий типа всплесков использовались короткие временные интервалы по 10 секунд. Результаты, опубликованные в работах [36*, 37*, 38*], можно сформулировать следующим образом:

i) Излучение на волнах в диапазоне 2 - 4 см состоит из узких ($40''$) , ($T_b = 0.2$ до 6×10^6 К) ядерных источников, которые окружены слабым ($T_b = 10^4$ до 10^5 К) протяженным гало ($200''$).

ii) Ядерные источники располагаются над пятнами и интерпретируются в рамках циклотронного излучения тепловых электронов.

iii) Ядра отдельных локальных источников, как показывает VLA, соединены корональными петлями.

iv) Обнаружены два источника ядерной компоненты, связанные по положению с волокном, лежащим над нейтральной линией фотосферного магнитного поля.

v) Один из источников D [37*] имел высокую яркостную температуру (7×10^6 К) на волне 4 см и резкий рост потока с длиной волны (см. Рис.8.). Для объяснения излучения такого рода источников, по-видимому, необходимо привлечение нетепловых механизмов.

vi) Наблюдения в дм. диапазоне показали, что ратановские наблюдения обнаруживают широкие протяженные источники над отдельной активной областью. Такие протяженные объекты не могут обнаруживаться на VLA, хотя в них заключена значительная часть потока радиоизлучения. С другой стороны, VLA карты регистрируют наличие узких ярких источников в диапазоне 20 см, поток от которых однако составляет лишь 2% от общего потока, регистрируемого на RATAN-600 от длины А0.

5.3 РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ ПО ПРОГРАММЕ "ИЮЛЬ 1990" [41*].

Совместные наблюдения проводились 21 и 22 июля 1990г. и были приурочены к наблюдению полного солнечного затмения. Синтезированные карты активной области AR6161 были получены на VLA на

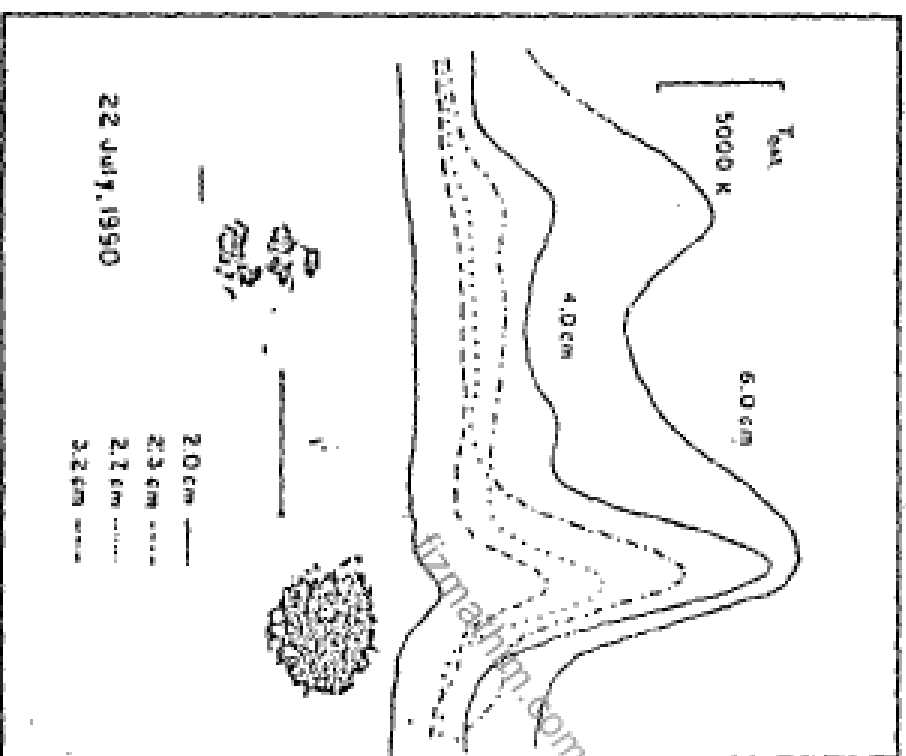


Рис.15. Слева - сканы активной области $\Delta\alpha 6162$, сделанные на РАТАН-600 на 6 волнах 22 июля 1990 г. и сопоставленные с изображениями в линии H_{α} (данные ГАС ГАО). Справа - синтезированные карты VLBA на 4-х волнах. Хорошо видно изменение структуры H_{α} над тенью пятен от компактных ядер (на волне 2.0 см) до протяженных образований (на волне 20.4 см), причем центр тяжести радиоизображения смещается с ростом длины волны в неэкваториальную область. По данным РАТАН-600 неэкваториальное излучение регистрируется на более коротких волнах (от 2.3 см).

волнах 2.0 см, 3.5 см, 6.2 см и 20 см. На радиотелескопе РАТАН-600 регистрация велась на девяти длинах волн в диапазоне 1,7 см-21 см.

В результате совместных исследований удалось построить пространственную картину активной области, состоящую из компактного ведущего пятна и хвостовой группы пятен, над которыми находятся яркие локальные источники, спектры которых объясняются магнитотормозным механизмом излучения. Между ними находится корональная конденсация с оптически тонким излучением тепловых электронов. По данным РАТАН-600 были построены спектры локальных источников и корональной конденсации, а по данным VLA была построена арочная структура корональных петель, соединяющая головное и хвостовые пятна (см. Рис.15).

На сантиметровых волнах четко локализован яркий источник вблизи ведущего пятна. Модельные расчеты, выполненные Вильсоном [41*], показали, что излучение этого источника может быть объяснено либо присутствием непотенциальных полей в короне, либо существованием больших магнитных градиентов, либо наличием узких трубок горячей плазмы, восходящих до уровней переходной области и короны.

5.4 РЕЗУЛЬТАТЫ СОПОСТАВЛЕНИЯ НАБЛЮДЕНИЯ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ СОЛНЦА В МАЕ 1980 Г. НА WSRT И НА РАТАН-600.

В ходе проведения международной программы Года Солнечного Максимума в период 1979-1982 гг. возникла дискуссия о пространственном местоположении локальных источников и ядер пятен. Наблюдениями на WSRT Кунду и Алиссандракиса [40] показали, что на волнах 6 см локальные источники не совпадают по положению с пятнами на фотосфере, тогда как наблюдения в сантиметровом диапазоне на РАТАН-600 обнаруживали четкое совпадение ЛИ и пятен. В связи с этим были проведены сопоставления совместных наблюдательных данных за период 22-27 мая 1980 г. На WSRT наблюдения проводились на волне 6.16 см ежедневно в течение 12 часов для синтезирования радиокарт активных областей HR 16862, 16863 и 16864 в полной интенсивности и круговой поляризации с разрешением $3.6''-4.2''$ в горизонтальном направлении и с разрешением $10.0''-12.2''$ в вертикальном. На РАТАН-600 наблюдения выполнялись в

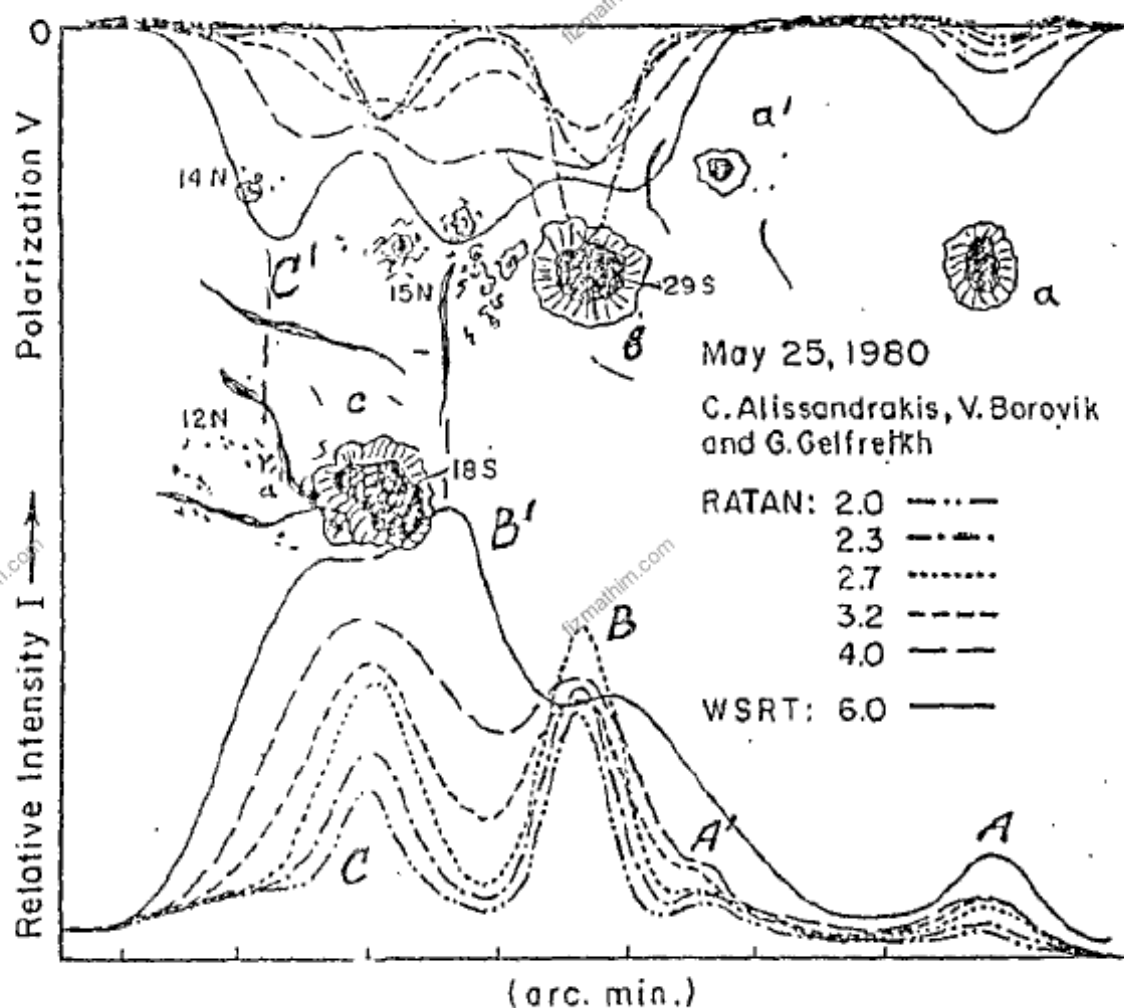


Рис.16. Сопоставление наблюдений на РАТАН-600 и WSRT активных областей HR 16862-16864 в мае 1980 г. по программе ГСМ. Локальные источники по данным РАТАН-600 совпадают с тенями пятен, тогда как по данным WSRT максимум локальных источников находится над волокнами.

Spectra of Radio Flux F of Local Sources

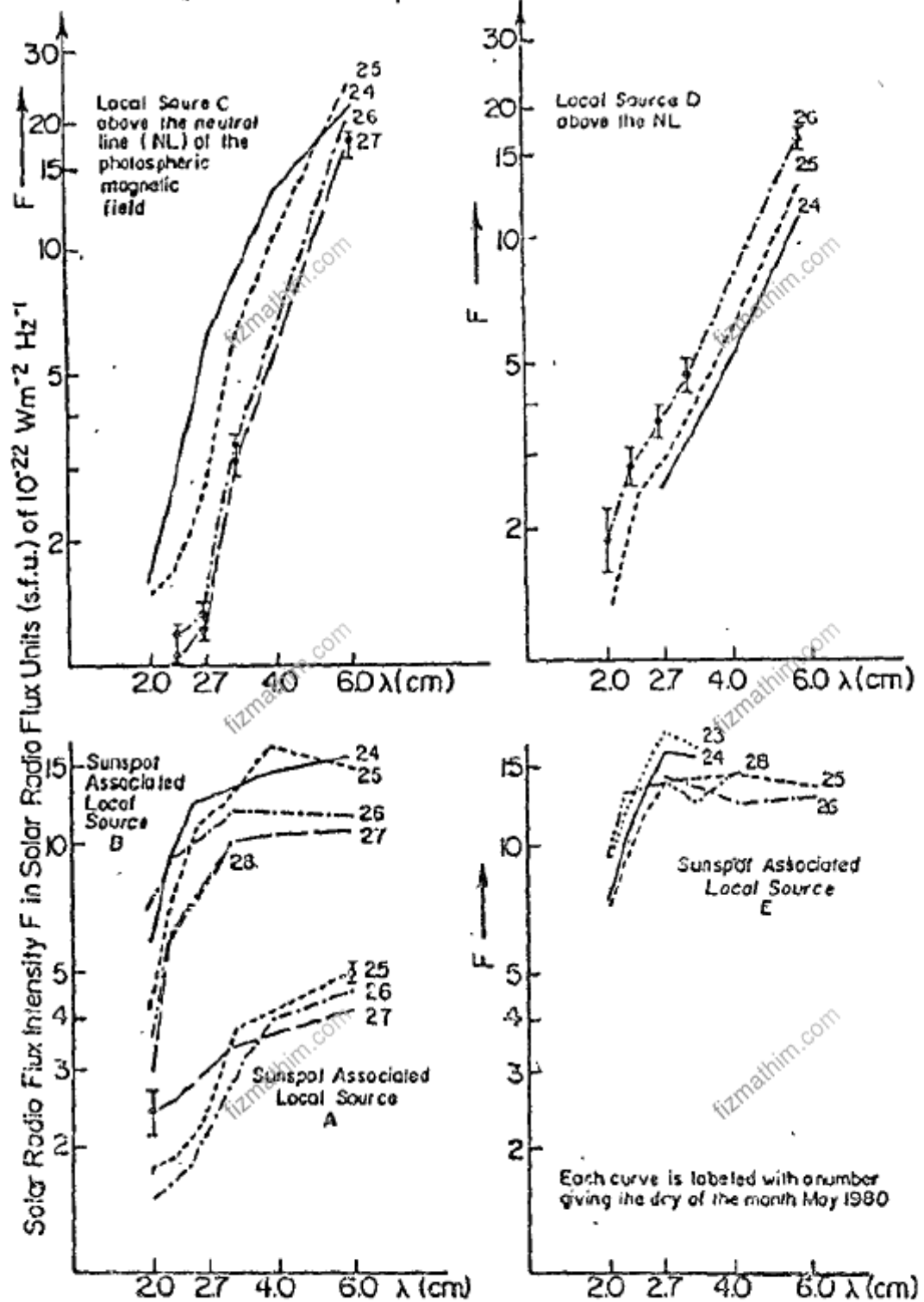


Рис.17. Спектры локальных источников А, А', В, В', С, С', (см. Рис.16), сделанных по совместным наблюдениям РТАИ-600 и WSRT.

стандартном режиме на Южном секторе с перископом на волнах 2.0 см, 2.3 см, 2.7 см, 3.2 см, 4.0 см с разрешениями (в направлениях E-W и N-S) 17" x 13', 19" x 15', 23" x 18', 27" x 21' и 34" x 26' соответственно. Сопоставление наблюдательных данных (см. Рис.16) выявило следующее:

Радиоизображения локальных источников (A), (B) и (C), полученных на РАТАН-600, хорошо совпадают по положению с тенями пятен, однако заметно уширение источника (C), возрастающее с длиной волны. Это уширение связано с вкладом локальных источников (B') и (C'), совпадающих по положению с нейтральной линией магнитного поля. Это еще один случай, демонстрирующий излучение так называемого "пекулярного" источника, стабильно существовавшего в течение всего периода наблюдений (5 дней). Для сопоставления данных было проведено стрип-интегрирование диаграммой РАТАН-600 двумерных изображений WSRT на волне 6 см. По результатам совместных наблюдений были построены спектры всех локальных источников (в том числе и пекулярных, см. Рис.17), которые хорошо дополняют друг друга. В совместной работе [37] делается вывод о необходимости привлечения нетепловых механизмов для объяснения таких солнечных объектов.

6. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СОЛНЦА НА РАТАН-600.

6.1.ВОЗМОЖНОЕ РАЗВИТИЕ АНТЕННЫХ РЕЖИМОВ ДЛЯ КАРТОГРАФИРОВАНИЯ СОЛНЦА

Опыт исследований Солнца на РАТАН-600 с помощью разработанных аппаратурных комплексов ССПК - ИКАР-32 и Панорамном анализаторе спектра показывает, что они являются мощными средствами для решения ряда актуальных задач физики Солнца. Однако, обладая несомненными преимуществами в спектральном анализе и поляризационных измерениях, возможностями проведения длительных серий наблюдений Солнца, РАТАН-600 имеет ряд существенных недостатков, к которым, прежде всего, следует отнести отсутствие двумерного картографирования.

Речь идет о возможности построения двумерных изображений

Солнца в широком диапазоне волн с использованием облучателя типа Конус. В работе [15*] нами предложен проект создания радиогелиографа на базе РАТАН-600. Система АП, благодаря расчлененной поверхности, предоставляет широкие возможности в конструировании различных режимов для получения радиоизображений. Ряд таких режимов был описан еще в известном выпуске "Известий ГАО" N 188 в 1972 г. (проект РАТАН-600). Предложенные в [15*] режимы основаны на антенной системе радиотелескопа в зенитном режиме с использованием $2/3$ апертуры основного отражателя антенны с размером 600×400 м и Облучателем типа Конус. Расчетное разрешение, например, для волны 2 см, составит $8'' \times 12''$. При этом возможны два основных режима построения радиоизображений: синфазный режим (А) и асинфазный режим (Б).

Режим А : Используются зонированные установки, которые обеспечивают в узкой частотной полосе синфазный сбор сигнала и формирование главного лепестка диаграммы направленности антенны. Построение карт избранных активных областей Солнца достигается растровым сканированием соответствующих участков его поверхности с последующей математической чисткой изображения с целью уменьшения влияния больших боковых лепестков на радиокарту Солнца. Сканирование осуществляется сочетанием суточного движения и последовательных перестановок отражающих элементов главного отражателя. Общее время построения карты порядка 1 часа. Многоволновость обеспечивается параллельными наблюдениями на нескольких кратных частотах (например, на волнах 12 см, 6 см, 4 см, 3 см и 2 см). При этом требование на зонирование установки антенны на наибольшей длине волны (12 см) автоматически обеспечивает синфазность и на перечисленных более коротких волнах.

Достоинства: высокая чувствительность метода по плотности потока радиоизлучения, позволяющая изучать как самые слабые объекты (радиогрануляцию), так и структуру ярких объектов на Солнце.

Недостатки: большое время синтеза около 1 часа, что малоприспособно для изучения быстропеременных объектов. На рис. показана расчетная диаграмма направленности радиотелескопа для режима А.

Режим Б. Используются асинфазные установки отражающих

элементов, при этом главный лепесток диаграммы разбивается на несколько десятков (около 100) лепестков о сильной зависимости их формы и расположения от частоты. Наблюдения проводятся на многоканальном спектрографе (несколько сот каналов). Совместный анализ записей на всех каналах позволит синтезировать (восстановить) изображение всего Солнца. При этом используется предположение о независимости распределения яркости от частоты в пределах достаточно узкой полосы анализа (около 5% от центральной либо смещением частоты, либо изменением положения отражающих элементов).

Достоинства:

1. Возможность построения карты всего диска Солнца за одно прохождение в течение 5 минут.
2. Возможность мгновенной локализации сильных радиоисточников на всем диске Солнца.
3. Возможность детального картографирования отдельной активной области за короткое время наблюдений (несколько секунд).
4. Отсутствие принципиальных ограничений на получение спектральной двумерной информации.
5. Возможность длительных (в течение нескольких часов) наблюдений.

Следует отметить, что реализация этого метода, особенно, пп.4 и 5, в значительной степени определяется мощностью применяемой ЭВМ и системой сбора информации.

На рис.18 показаны примеры расчетных диаграмм радиотелескопа для работы в этом режиме.

Примерные параметры радиогелиографа РАТАН-600

Диапазон	4 см (8см)
Число каналов	400-500
Угловое разрешение (HPBW)	
E - W	16(32) /arcsec/
N - S	24(48) /arcsec/
Временное разрешение (в зависимости от яркости размеров картографируемой области)	до нескольких минут

Возможны реализация и совмещение осевых режимов (режим АБ).

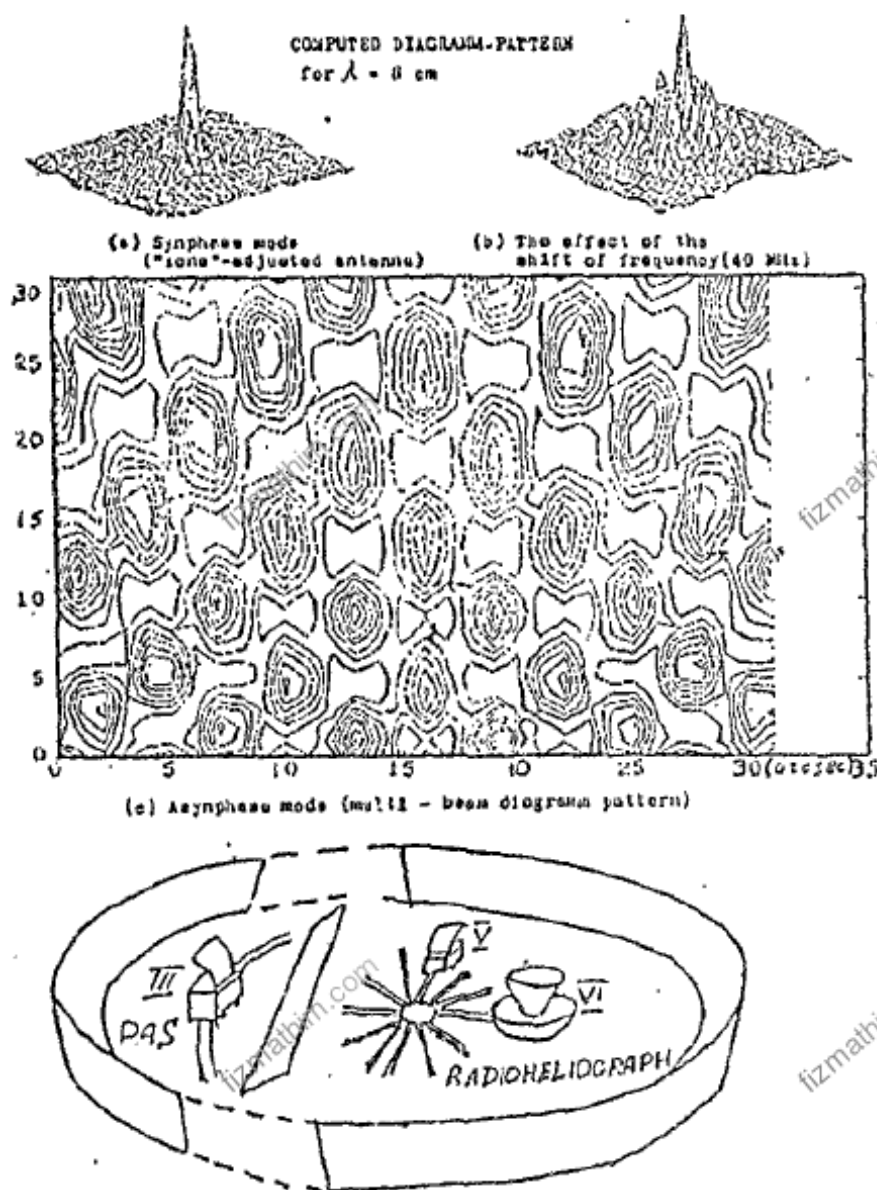


Рис. 18 Диаграмма направленности РАТАН-600 в режиме радиогелиографа в синфазном режиме (а) и асинфазном режиме со смещением частоты от синфазной на 40 МГц (б). Расчетная многолепестковая диаграмма в асинфазном режиме приведена на Рис. (с). Внизу показана схематически работа радиотелескопа в качестве радиогелиографа (работают Северный Восточный и Западный сектора). На Южном секторе с Перископом одновременно можно проводить наблюдения на Панорамном Анализаторе Спектра.

когда для небольшого числа каналов спектрографа осуществляется синфазная (зонированная) установка, а для остальных реализуется работа в асинфазном режиме Б. Существенна также возможность параллельных наблюдений радиогелиографа и ПАС на Южном секторе с перископом.

Интересное и весьма перспективное решение о совмещении патрульных картографических наблюдений Солнца с помощью системы малых зеркал и радиотелескопа РАТАН-600 можно реализовать, применив идеи синтеза радиоизображения. Такая система может состоять из головной антенны и ряда рассредоточенных малых зеркал (стадо). Расположение и количество малых зеркал выбирается исходя из чувствительности, необходимой для регистрации всплесковых событий. В случае, когда к антенной системе подключается зеркало РАТАН-600 (например в режиме Южный сектор с перископом при наблюдениях в меридиане или в нескольких азимутах) с большой собирающей поверхностью, чувствительность системы резко возрастает, что будет достаточным для детальной оценки состояния активной области. Такая система позволит совместить с минимальными затратами сочетание слежения двумерного картографирования всего диска Солнца и высокую чувствительность системы. Данный режим удобен отчасти и тем, что он легко совмещается с другими несолнечными программами, ведущимися на радиотелескопе РАТАН-600.

6.2 ПОВЫШЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНОГО И ВРЕМЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ В НАБЛЮДЕНИЯХ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЦА

Для решения ряда спектральных задач (таких как поиск циклотронных линий [7], возможное обнаружение рекомбинационных линий [41], изучение узких спектральных деталей, на существование которых указано в [22], подробное изучение магнитосферы активной области с использованием эффекта неоднократных смен знака поляризации в QT-области и поиск в связи с этим особых точек - индикаторов нейтральных токовых слоев [34] и т.д.) необходимо продолжать развивать в солнечных исследованиях на РАТАН-600 спектральное направление как с целью повышения частотного разрешения, так и для увеличения перекрытия диапазона. Возможности радиотелескопа в отношении времени наблюдения за объектом и

реализации режима слежения далеко не исчерпаны, их реализация может предоставить исследователям возможность проводить одновременно как анализ спектра, так и временных изменений отдельных солнечных образований. Важность таких исследований для физики Солнца и солнечно-земных связей трудно переоценить.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Созданные аппаратурные комплексы ССПК и Панорамный анализатор спектра на РАТАН-600, большое количество наблюдений и работ, выполненных с помощью этих комплексов, разработанные и реализованные методы измерения магнитных полей в солнечной короне и диагностика других параметров солнечной плазмы, подробные исследования структуры активных областей на Солнце, все это позволяет сделать заключение о высокой эффективности спектрально-поляризационных наблюдений на РАТАН-600. Вместе с тем накопленный опыт открывает перспективы и для будущих исследований Солнца с уже существующим комплексом панорамной аппаратуры, и определяет возможные пути значительного увеличения технических возможностей в будущем.

8. ЛИТЕРАТУРА

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1*. Богод В.М., Корольков Д.В., Радиометр сантиметрового диапазона на полупроводниковых элементах, Изв. ВУЗ'ов, Радиофизика, 16, №.5, 691-694, 1973.

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, 11, 93-100, 1976.

3*. Богод В.М., Гельфрейх Г.Б., Радиомагнитограф, Описание изобретения к авторскому свидетельству N 428332, 1, 1974.

4*. Богод В.М., Дикий В.Н., Корольков Д.В., Сорель В.Е., Многоволновой облучатель на резонаторах бегущей волны с единым фазовым центром для применения в радиоастрономии, Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 17, 124-130, 1983.

5* . Богод В.М., Гельфрейх Г.Б., Петров З.Е., Автоматизированный солнечный спектрально-поляризационный комплекс ИКАР-16 на радиотелескопе РАТАН-600; Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 20, 102-116, 1985.

6*. Есепкина Н.А., Богод В.М., Кочергина И.С., Новицкий А.П., Прусс-Жуковский С.В., Шилин А.И., Жуков А.А., Акустооптический спектрополяриметр; Препринт ЛФ САО АН СССР, 43Л, 1-18, 1987.

7*. Богод В.М., Бутенко А.Д., Комаров В.В., Новое поколение радиополяриметров сантиметрового диапазона для исследования радиоизлучения Солнца, Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 26, 116-120, 1988.

8*. Богод В.М., Номар Н.П., Применение схемы линейного интегратора со сбросом в быстродействующих многоканальных анализаторах спектра, Препринт 85, САО РАН, Нижний Архыз, с. 7-14, 1992.

9*. Bogod V.M., Vatrushin S.M., Abramov-Maximov V.E., Tavetkov S.V., Dikij V.N., The Panoramic Analyser of a Radio Spectra as an Instrument for Measurements of Coronal and Chromospheric Magnetic Fields on the Sun. Proceedings of IAU Colloquium, No.141, p.79., 1992.

10*. Богод В.М., Дикий В.Н., Комаров В.В., Петров З.Е. Радиометрический многоволновый комплекс для наблюдений солнечных затмений. 21-я Всесоюзная конференция "Радиоастрономическая аппаратура", Ереван, 19-21 октября 1989 года. Тезисы, с.11.

11*. Есепкина Н.А., Богод В.М., Дравских А.Ф., Дравских З.В., Власов О.Н., Круглов С.К., Морозов А.С., Прусс-Жуковский С.В., Акусто-оптический радиоспектрометр для солнечных исследований на РАТАН-600, Там же, с.182.

12*. Богод В.М., Дикий В.Н., Совмещенный облучатель панорамного приемного комплекса в диапазоне 3.5-18 ГГц. 22-я Всесоюзная конференция "Радиотелескопы и интерферометры", Ереван, 15-17 мая 1990г. Тезисы докладов, с.81.

13*. Богод В.М., Гельфрейх Г.Б., Коржавин А.Н., Основные принципы работы радиогелиографа РАТАН-600 с облучателем тип VI, 22-я Всесоюзная конференция "Радиотелескопы и интерферометры". Ереван, 15-17 мая 1990г., Тезисы докладов, с.90-91.

14*. Дикий В.Н., Богод В.М., Предельные шумовые характеристики

полосковой антенны на резонаторах бегущей волны. 18-я всесоюзная конференция "Радиотелескопы и интерферометры", Иркутск, 14-16 октября 1986г., Тезисы, с.195-196.

15*.Богод В.М., Коржавин А.Н., Гельфрейх Г.Б., Опыт наблюдений Солнца на радиотелескопе РАТАН-600 и перспективы их развития в 22-м цикле солнечной активности, Солнечно-земная физика, 5-ый симпозиум КАПГ, Самарканд 2-6 октября 1989 года, Москва, с.40-41, 1989.

16*.Боровик В.Н., Гельфрейх Г.Б., Богод В.М., Коржавин А.Н., Плотников В.М., Хильдебрандт И., Крюгер А., Эволюция спектрально-поляризационных характеристик импульсного радиовсплеска и энерговыделение в солнечных вспышках. Там же, с.62-63.

17*.Богод В.М., Комаров В.В., Коржавин А.Н., Опейкина Л.В., Шатилов В.А., Боровик В.Н., Гельфрейх Г.Б., Наблюдения на РАТАН-600 активных областей на Солнце в период работы КА "СОБОС-1" в июле-августе 1988г. Там же, с.64-65.

18*.Богод В.М., Корольков Д.В., Обнаружение "хромосферной сетки" на Солнце в сантиметровом диапазоне волн, Письма в АЖ, No.10, 25-27, 1975.

19*.Gelfreikh G.B., Bogod V.M., Korzhavin A.N., Kononovich E.V., Solar radio granulation at microwaves and its optical identification, Sun and Planet. System.Reidel Publ.Co., 109-112, 1982.

20*.В.М.Богод, "Измерения параметров радиогрануляции по наблюдениям на Радиотелескопе РАТАН-600; Сообщения САО, N23, 22-42, 1978.

21*.Богод В.М., Гельфрейх Г.Б., Коржавин А.Н., Пустильник Л.А., Предложения по использованию радиотелескопа РАТАН-600 в программах 22-го цикла солнечной активности. Препринт САО АН СССР No 22, Н.Армз, с.1-22, 1988.

22*.Kruger A., Bogod V.M., Korzhavin A.N., Gelfreikh G.B., Some results cooperative investigations on solar radio emission with RATAN-600, Astron. Nachr., 311, 401-404, (1990)6.

23*.Bogod V.M. Perspectives of advance of RATAN-600 solar observations, Astron. Nachr., 313, 97-100, (1992)2.

24*.Боровик В.Н., Богод В.М., Ватрушин С.М., Гарзиков В.И., Опейкина Л.В., Цветков С.В., Шатилов В.А., Активные области на

Солнце в день солнечного затмения 11 июля 1991 года по наблюдениям на РАТАН-600. в кн.Пространственно-временные аспекты солнечной активности, С-Петербург, ФТИ РАН, с.189-196, 1992.

25*.Akhmedov Sh.B., Bogod V.M., Furstenberg F., Hildebrandt J., Kruger A., On the Hight Scale of Magnetic Fields above Sunspots derived from RATAN-600 and Model Calculations, Publications of Debrecen Heliophysical Observatory, v.5, 619-629, 1983.

26*.Gelfreikh G.B., Bogod V.M., Abramov-Maximov V.E., Tsvetkov S.V., The Methods of Measurements of the Solar Magnetic Fields Using Radio Observations with the RATAN-600. Proceedings of IAU Colloquium, No 141, p.75, 1992.

27*.Богод В.М., Ватрушин С.М., Абрамов-Максимов В.Е., Цветков С.В., Дикий В.Н., Панорамный радиометрический анализатор спектра диапазона 3.5 - 18 ГГц с цифровой обработкой регистрации, Препринт САО, 1993.

28*.Bogod V.M., Gelfreikh G.B., Ryabov B.I., Hafizov S.R., Coronal magnetic fields from effect of the double inversion of circular polarization of radio emission, Proceedings of IAU Colloquium, No 141, 1992.

29*.Lang K.R., Willson R.F., 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, Aph. J., 1993 (to be submitted).

30*.Bogod V.M., Gelfreikh G.B., Measurements of the magnetic fields and the gradient of temperature in the solar atmosphere above a flocculus using radio observations, Solar Physics, 67, No.1, 29-46, 1980.

31*.Богод В.М., Гельфрейх Г.Б., Наблюдение активного протуберанца в см диапазоне волн на РАТАН-600, Письма в АЖ, т.1, No 10, 25, 1975.

32*.Богод В.М., Вяльшин Г.Ф., Гельфрейх Г.Б., Петрова Н.С., О градиенте магнитного поля над пятнами по оптическим и радиоастрономическим измерениям, Солнечные данные, N 1, 104-109, 1982.

33*.Ахмедов Ш.Б., Боровик В.Н., Гельфрейх Г.Б., Богод В.М.,

Коржавин А.Н., Петров З.Е., Хофманн А., Бахманн Р., Кооперативные магнитографические и радиоастрономические исследования активной солнечной области AR 3804 в июле 1982 г., *Астрофиз. исслед.*, (Изв. САО), 28, 111-122, 1989.

34*. Akhmedov Sh.B., Gelfreikh G.B., Bogod V.M., Korzhavin A.N., The measurement of magnetic fields in the solar atmosphere above sunspots using gyroresonance emission, *Solar Physics*, 79, 41-58, 1982.

35*. Akhmedov Sh.B., Bogod V.M., Borovik V.N., Gelfreikh G.B., Korzhavin A.N., On the search of current sheets in the solar atmosphere using radio observations, *Solar Maximum Analysis*, VNU Science Press, p.51-56, 1986.

36*. 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 RATAN-600 в июле 1982 г. Часть 1: AR 3804, *Астрофиз. исслед.*, (Изв. САО), 25, 105-134, 1987.

37*. Akhmedov Sh.B., Borovik V.N., Gelfreikh G.B., Bogod V.M., Korzhavin A.N., Petrov Z.E., Dikij V.N., Lang K.R., Wilson R.F., Structure of a solar active region from RATAN-600 and Very Large Array observations, *Astrophys. J.*, 301, No.1, part1, 460-464, 1986.

38*. Ахмедов Ш.Б., Богод В.М., Боровик В.Н., Вильсон Р.Ф., Структура активных областей на Солнце по наблюдениям на VLA; Препринт САО, N 194, 1-58, 1985.

39*. Alissandrakis C.E., Bogod V.M., Borovik V.N., Gelfreikh G.B., Korzhavin A.N., Nindows A., Kundu M.R., Spectral observations of active regions on the Sun with RATAN-600 and WSRT, *Astron. Astrophys.*, 1992.

40*. Akhmedov Sh.B., Bogod V.M., Borovik A.V., Gelfreikh G.B., Dikij V.N., Korzhavin A.N., Shatilov V.A., Local source components of solar microwave radiation: a comparison of VLA, WRST and RATAN-600 data, in Stepanov, V.E., Obridko, V.N., Smolkov, G.Ya., eds. *Solar Maximum Analysis. Additional Issue. Proceedings of the International Workshop held in Irkutsk, USSR, 17-24 June, 1985*, pp 76-79, "Nauka", Siberian Division, Novosibirsk, 1988.

41*. Bogod V.M., Gelfreikh G.B., Willson R.E., Lang K.R.,

Opeikina L.V., Shatilov V.A., Tsvetkov S.V., Very Large Array - RATAN-600 observation of a solar active region, Solar Physics, v.141, p.303-323, 1992.

42*.Парийский Ю.Н., Корольков Д.В., Шиврис О.Н., Кайдановский Н.Л., Есепкина Н.А., Зверев Ю.К., Стоцкий А.А., Ахмедов Ш.Б., Богод В.М., Болдырев С.М., Гельфрейх Г.Б., Ипатов М.А., Коржавин А.Н., Романцов В.В., Наблюдения Солнца на РАТАН-600. Первые результаты, Астрономический Журнал, 53, вып.5, 1017-1026, 1976.

43*.Akhmedov Sh.B., Bogod V.M., Gelfreikh G.B., Hildebrandt J., Kruger A., A study of "thermal" and "nonthermal" S-component emissions generation outside sunspots, Contributions of the Astronomical Observatory Skalnat Pleso, 15, 339-344, 1986.

44*.Ахмедов Ш.Б., Богод В.М., Боровик В.Н., Гельфрейх Г.Б., Ихсанова В.Н., Коржавин А.Н., Петерова Н.Г., Спектральные особенности локального источника радиоизлучения, связанного с августовской группой пятен 1972г., Солнечные данные, 97-104, 1975.

45*.Ахмедов Ш.Б., Богод В.М., Гельфрейх Г.Б., Результаты исследования локального источника активной области Mac Math 15974 по программе GSM по наблюдениям на РАТАН-600, Год солнечного максимума, Изд ИЗМИРАН, М.2, 45-52, 1981.

46*.Kruger A., Hildebrandt J., Bogod V.M., Korzhavin A.N., A study of RATAN-600 observations of solar S-component sources, Solar Physics, 105, 111-121, 1986.

47*.Ахмедов Ш.Б., Богод В.М., Гельфрейх Г.Б., Хильдебрандт И., Типы источников S-компоненты солнечного радиоизлучения и их, связь со вспышечной активностью групп пятен, Солнечные данные, No.5, 68-72, 1985.

48*.Богод В.М., Коржавин А.Н., О некоторых особенностях излучения локальных источников на Солнце в диапазоне 2.3-2.7 см, Астрофиз. исслед. (Изв САО), 121-133, 1975.

49*.Borovik V.N., Gelfreikh G.B., Bogod V.M., Korzhavin A.N., Kruger A., Hildebrandt J., Urpo S., The spectrum of coronal sources at millimeterband centimetre waves, Solar Physics, 124, 157-166, 1989.

50*.Kruger A., Bogod V.M., Korzhavin A.N., Gelfreikh G.B., Some results of cooperative investigations on solar radio emission with RATAN-600, Astronomischen Nachrichten, 311, No.6, 401-404.

1990.

51*. Bogod V.M., Korzhavin A.N., Akhmedov Sh.B., Hildebrandt J., Kruger A., On the question of long lasting microwave emission far from the solar limb, Contribution of the Astronomical Observatory Skalnat Pleso, v.15, p.717-720, 1986.

52*. Абрамов-Максимов В.Е., Ватрушин С.М., Гельфрейх Г.Б., Ахмедов Ш.Б., Богод В.М., Петров З.Е., Шатилов В.А., Особенности проявления солнечной активности в июле-августе 1985г. по наблюдениям в радиодиапазоне с высоким пространственным разрешением, Всесоюзная конференция "Физика Солнца", Алма-Ата, 22-26 июня 1987г. Тезисы докладов, с.92.

53*. Ахмедов Ш.Б., Боровик В.Н., Гельфрейх Г.Б., Богод В.М., Коржавин А.Н., Радиоструктура активных областей на Солнце. Всесоюзный симпозиум по солнечно-земной физике. Иркутск, 22-27 сентября 1986г., Тезисы, с.30-32.

54*. Макаров В.И., Макарова В.В., Богод В.М., Коржавин А.Н., Опейкина Л.В., Шатилов В.А. Полярные факелы на Солнце в белом свете и в радиодиапазоне, Солнечные данные, No 9, с. 87-90, 1991.

55*. Bogod V.M., Korzhavin A.N., Akhmedov Sh.B., Aurass H., Hildebrandt J., Kruger A., On the complex spatial structure of a gradual microwave burst, Solar Physics, 129, No.2, 351-361, 1990.

56*. Kruger A., Bogod V.M., Akhmedov Sh.B., Investigation of the spectrum of gradual (PBI) microwave burst emission from RATAN-600 observations, Contributions of the Astronomical Observatory Skalnat Pleso, 15, 643-648, 1986.

57*. Андрианов С.А., Ахмедов Ш.Б., Богод В.М., Болдырев С.И., Боровик В.Н., Гельфрейх Г.Б., Зуева В.А., Коржавин А.Н., Петров З.Е., Плотников В.М., Плотникова Г.Б., Чех С.А., Результаты наблюдений Солнца на радиотелескопе РАТАН-600 в диапазоне 2 - 4 см в период Года Солнечного Максимума. Т.1. Данные наблюдений 15 декабря 1979 - 3 апреля 1980. Материалы мирового центра данных Б. М., pp. 1-176, 1990.

58*. Андрианов С.А., Ахмедов Ш.Б., Богод В.М., Болдырев С.И., Боровик В.Н., Гельфрейх Г.Б., Зуева В.А., Коржавин А.Н., Петров З.Е., Плотников В.М., Плотникова Г.Б., Чех С.А., Результаты наблюдений Солнца на радиотелескопе РАТАН-600 в диапазоне 2-4 см в период Года Солнечного Максимума. Т.2. Данные наблюдений 5 апреля

1980 - 12 сентября 1980. Материалы мирового центра данных Б, pp. 1-186, 1991.

59*. Андрианов С.А., Ахмедов Ш.Б., Богод В.М., Болдырев С.И., Боровик В.Н., Гельфрейх Г.Б., Зуева В.А., Коржавин А.Н., Петров З.Е., Плотников В.М., Плотникова Г.Б., Чех С.А., Результаты наблюдений Солнца на радиотелескопе РATAN-600 в диапазоне 2 - 4 см в период Года Солнечного Максимума. Т.3. Данные наблюдений 13 сентября 1980 - 28 января 1981. Материалы мирового центра данных Б, pp. 1-182, М., 1992.

60*. Богод В.М., Болдырев С.И., Зуева В.А., Коржавин А.Н., Петров З.Е., Плотников В.М., Шатилов В.А., Результаты наблюдений Солнца на радиотелескопе РATAN-600 в диапазоне волн 0.8 - 31.6 см. 1984 г. Материалы мирового центра данных Б, Москва, с.1-186, 1992.

61*. Bogod V.M., Korzhavin A.N., Peterova N.G., Shatilov V.A., Vatrushin East-West solar scans for 7 February - 1 March, 1984, from Zelenchukskaja, North Caucasus, USSR. Solar-Geophysical Data, report UAG-96, 62, 1987.

62*. Богод В.М., Солнечный спектрально-поляризационный комплекс РATAN-600 и некоторые результаты исследования Солнца, Кандидатская диссертация, Горький, НИРФИ, 1980.

Цитированная литература

1. Гельфрейх Г.Б., Ахмедов Ш.Б., Боровик В.Н., Гольнев В.Я., Коржавин А.Н., Нагнибеда В.Г., Петерова Н.Г., Известия ГАО, No.185, 167-182, 1970.

2. Gelfreikh G.B., Peterova N.G., Ryabov B.I., Solar Physics, 108, 89-97, 1987.

3. Korzhavin A.N., Gelfreikh G.B., Vatrushin S.M., Solar Magnetic Field and Corona, Nauka, Novosibirsk, v.2, 119-124, 1989.

4. Ватрушин С.М., Коржавин А.Н., Труды 6-го семинара РГ "Специальные теоретические и экспериментальные исследования солнечной плазмы", Наука, М., 100-104, 1989.

5. Боровик В.Н., Курбанов М.Ш., Лифшиц М.А., Рябов Б.И., Астрономический журнал, т. 67(5), с. 1038-1052, 1990.

6. Borovik V.N., Kurbanov M.Sh., Astronomische Nachrichten, 311, 371-373, 1990.

7. Zheleznyakov V.V., Zlotnik E.Ya., Radio Physics of the SUN, Kundu and Gergely (eds), 87-99, 1980.

8. Посошенко Л.З. и др., Многоканальное устройство автоматической регистрации информации для радиометров СВЧ, Тезисы докладов, Всесоюзная-школа-семинар, Ереван, 1974.

9. Петров З.Е., Кандидатская диссертация, 1986.

10. Шатилов В.А., Кандидатская диссертация, 1992.

11. Шатилов В.А., Известия САО, No25, 168-175, 1987.

12. Андрианов С.А., Кандидатская диссертация, 1988.

13. Гельфрейх Г.Б., Астрономический циркуляр, No699, 3, 1972.

14. Гребинский А.С., Астрономический журнал, т.62, 768-775, 1985.

15. Лившиц М.А., Обридко В.Н., Пикельнер С.Б., Астрономический журнал, т. 43, 1135, 1966.

16. Гельфрейх Г.Б., Коваль А.Н., Степанян Н.Н., В кн. Год солнечного максимума, т.2, М. Наука., 193-196, 1981.

17. Абрамов-Максимов В.Е., Гельфрейх Г.Б., Письма в АЖ, 9, No.4, 244-249, 1983.

18. Обридко В.Н., Солнечные пятна и комплексы активности, М., Наука., 1985.

19. Гельфрейх Г.Б., Коржавин А.Н., 1978 IX - Консультация по солнечной физики, стр. 21, Вроцлав, 1978.

20. Братова Е.Ф., Гельфрейх Г.Б., Гнездилов Ф.Ф., Письма в АЖ, 9, No.8, 495-499, 1983.

21. Коржавин А.Н., Петерова Н.Г., Препринт САО, 1993 (в печати)

22. Каверин А.Н., Кобрин М.М., Коршунов А.И., Тихомиров В.А., Тихомиров Ю.В., Письма в АЖ, No 2, 577, 1976.

23. Gelfreikh G.B., Contributions of the Astronomical Observatory Skalnat pleso, 15, 33-47, 1986.

24. Железняков В.В., Электромагнитные волны в космической плазме, 1977.

25. Железняков В.В., Радионизлучение Солнца и планет, М., Наука, 1964.

26. Korzhavin A.N., Sych R.A., Uralov A.N., Solae Physics, 1992, (in press).

27. Д.В. Корольков, Н.С. Соболева, Г.Б. Гельфрейх, Известия ГАО, No.164, 81-113, 1964.

28. Петерова Н.Г., Рябов Б.И., Астр.ж., №58, 1070, 1981

29. Дикий В.Н., Комаров В.В., Конструктивный расчет полосковых антенн на резонаторах бегущей волны. 18-я всесоюзная конференция "Радиотелескопы и интерферометры", Иркутск, 14-16 октября 1986г., Тезисы, с.197-198.

30. Gelfreikh G.B., Basic results and a perspective for future observation on RATAN-600, *Astronomische Nachrichten*, v.311, No.6, 385-390, 1990.

31. Гельфрейх Г.Б., Проблематика и перспективы исследований Солнца на РАТАН-600, Сообщения САО, вып.68, с.71-76, 1991.

32. Гельфрейх Г.Б., Опейкина Л.Б., Моделирование работы РАТАН-600 в режиме радиогелиографа, Препринт САО РАН, No 96, 1992 (в печати).

33. Gelfreikh G.B., Proceedings of the Workshop on the Solar Electromagnetic Radiation Study for Solar Cycle 22, (SOLARS22), ed. R.F. Donnelly, Boulder, USA, 196-227, 1992.

34. Ryabov B.I., Spector A.R., Publ. of Debrecen Heliophysical Observatory, v.5, pp.323-332, 1983.

35. Cohen M.H., *Aph.J.*, v.131, 664, 1960.

36. Zheleznyakov V.V., Zlotnik E.Ya., *Solar Physics*, v.68, No.2, 317-326, 1980.

37. Железняков В.В., Злотник Е.Я., Известия ВУЗов, Радиофизика, т. XX, No9, 1444-1461, 1977.

38. Петерова Н.Г., Ахмедов Ш.Б., Астрон.ж., т.50, 1220, 1973.

39. Боровик В.Н., Курбанов М.Ш., Шатилов В.А., Солн. Данные, No11, 110-118, 1988.

40. Kundu M.R., Alissandrakis C.E., *Solar Physics*, v.94, 249-283, 1984.

41. Херсонский В.К., Варшалович Д.А., Астрон. Журнал, т.57, вып.3, 621-623, 1980.

42. Гельфрейх Г.Б., Корольков Д.В., Смольков Г.Я., Тресков Т.А., В кн. Результаты наблюдений в период МГСС. Сибирь и Дальний Восток. М., Наука, вып. 4, с. 168-179, 1967.

43. Рябов Б.И., в сб. "Исследование Солнца и красных звезд", No.5, 5-24, 1982.