

УДК 523.98

Результаты исследования солнечной активности на РТ–22 НИИ “КрАО” в микроволновом диапазоне

Л.И. Цветков

НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория”, 98409, Украина, Крым, Научный

Поступила в редакцию 14 февраля 2006 г.

Аннотация. Кратко излагается история исследования микроволнового излучения Солнца по наблюдениям на РТ-22 КрАО и основные достижения в изучении солнечной активности за период наблюдений 1965–2005 гг.

RESULTS OF RESEARCH OF SOLAR ACTIVITY WITH RT–22 SRI CrAO IN MICROWAVE REGION. *by Tsvetkov L.I.* The history of research of microwave radiation of the Sun by means of the RT-22 SRI CRAO and the main achievements in investigations of solar activity during 1965–2005 are described.

Ключевые слова: радиотелескоп, радиоизлучение, локальные источники, радиовсплески, активные области, поляризация радиоизлучения.

1 Введение

Первые пробные наблюдения Солнца на РТ-22 были начаты в 1965 году. Для наблюдений в первичном фокусе был смонтирован совмещенный облучатель на 0.8 и 3 см. Использовались разработанный в СКБ ИРЭ АН СССР радиометр на волну 8 мм и приемник П5-10, настроенный на волну 3.15 см. Проводились измерения фокального пятна, точности ведения телескопа, управляемого аналоговой вычислительной машиной и цифровой ЭВМ. В результате измерений был сделан выбор в пользу цифровой ЭВМ разработки МНИИП (г. Москва), которая находилась в процессе отладки системы управления (СУ) радиотелескопа главным конструктором Введенским В.А. и группой сотрудников КрАО во главе с Ивановым В.Н. В последующие годы группой управления РТ-22 руководили П.Н. Стежка, а затем Г.И. Шевченко. Радиотелескоп РТ-22 принят в эксплуатацию комиссией АН СССР во главе с академиком В.А. Котельниковым осенью 1966 г.

В конце 60-х с целью усовершенствования радиотелескопа РТ-22 была разработана двух-зеркальная система облучения. Исходные данные для расчета системы облучения составлялись по согласованию с заведующим отделом Моисеевым И.Г. Система Кассегрена радиотелескопа была реализована в 1969 г. Конструкция вторичного зеркала была разработана Мониным Ю.Г., а само зеркало обрабатывалось в мастерской п. Научный. Наличие такой схемы облучения антенны радиотелескопа обусловило разработку приемной аппаратуры ММ- и СМ- диапазонов для наблюдений Солнца, которая должна была располагаться в кабине ПВН-телескопа под основным зеркалом. В качестве облучателей ММ-диапазона используются конические рупора, а для

наблюдений в СМ-диапазоне на первом этапе использовался двухзеркальный облучатель системы Грегори. Оба типа облучателей позволяют измерять поляризацию радиоизлучения локальных источников на Солнце с малыми искажениями.

Конические рупора на волны 8 и 13 мм и двухзеркальный облучатель на волны 3.4 и 3.55 см разработаны Григорьевой М.И. под руководством член-корр. АН СССР Бахраха Л.Д. (Бахрах и др., 1973). В дальнейшем система облучения основного зеркала РТ-22 совершенствовалась путем оптимизации параметров конических рупоров ММ-диапазона, а также оснащением антенны широкополосным скалярным рупором СМ-диапазона (Поздняков, Цветков, 1992). Наконец, в 2004 году было заменено вторичное зеркало диаметром 150 см на новое, изготовленное в РИ НАНУ, г. Харьков. С целью исключения аппаратурных ошибок при исследовании колебаний микроволнового излучения Солнца были проведены измерения вибрационных мод конструкции радиотелескопа РТ-22 и их влияния на флуктуационные ошибки наведения (Кисляков и др., 1992).

Основные этапы создания и внедрения приемной аппаратуры для поляризационных наблюдений солнечного радиоизлучения на РТ-22 были следующие:

1967 г. Многоканальный радиометр на волну 8 мм (I) – (Ефанов, Моисеев, 1967);

1968 г. Поляриметр на волну 3.15 см (I,U,Q,V) – (Ерюшев, Цветков, 1969);

1969 г. Радиометры на волны 4.0, 8.1, 13.2 и 16.6 мм (I) – (Ефанов, Моисеев, 1971);

1970 г. Поляриметр на волну 8 мм (I,V) – (Ефанов, Моисеев, 1973);

1971 г. Поляриметр на волны 1.9, 2.5 и 3.5 см (I, V) – (Цветков, 1974);

1972 г. Радиометр на волну 8.2 мм (I) – (Ефанов, 1974);

1974 г. Поляриметр на волну 13.5 мм (I,V) – (Домнин и др., 1978);

1979 г. Поляриметр на волну 2.25 см (I,V,Q) – (Цветков, 1980);

1988 г. Поляриметр на волны 3.5, 2.8, 2.25 и 1.95 см – (Бачурин и др., 1993);

1990 г. Поляриметр на 13 мм (I,V) и 8 мм (I) – (Нестеров, Стрепка, 1992);

Спектрально-поляриметрический комплекс диапазона 0.6-12.5 см на базе РТ-22 и трех малых радиотелескопов – (Цветков, 2001; Юровский, Цветков, 2003), который в настоящее время находится в стадии реализации.

Следует отметить, что идеология разработки радиометров ММ-диапазона принадлежит Ефанову В.А., а основные идеи технических решений радиоастрономической аппаратуры СМ-диапазона реализованы автором данной статьи. Практически все радиометры РТ-22, предназначенные для измерения радиоизлучения Солнца, созданы в лаборатории радиоастрономии (ЛРА). В изготовлении аппаратуры принимали активное участие Монин Ю.Г., Поздняков М.М., Жданов Н.Н., Мозговой И.М., Горшенин Л.П. Существенную помощь в изготовлении радиометров, а также монтаж их на антенне и обслуживание оказывали Стрепка И.Д. и Миронов М.А. Очень важная работа по исследованию систематических ошибок наведения РТ-22 и наклона его вертикальной оси выполнена Н.С. Нестеровым (Нестеров, 1985). В 1984 г. введена в эксплуатацию модернизированная система управления РТ-22 КрАО. После автоматизированного учета систематических ошибок наведения система обеспечивает установку радиотелескопа на объект со среднеквадратичной ошибкой около $10''$ (Введенский и др., 1988).

Процедура наблюдений Солнца и сбора информации с выходов радиометров полностью автоматизирована. На первом этапе была создана многоканальная система автоматической регистрации и обработки данных на основе ЭВМ “Наири-К” (Домнин, Корсенский, 1977). На втором этапе модернизации системы управления РТ-22 она была создана на основе микро ЭВМ “Электроника-60” (Ларионов, Капусткин, 1973). Эта система эксплуатировалась в течение ряда лет. В настоящее время функционирует новая система управления РТ-22 на основе персонального компьютера IBM PC/AT и аппаратуры КАМАК (Баранов и др., 1998; Нестеров, Никитин, 2002).

2 Радиоизлучение спокойного Солнца

Результаты исследования особенностей микроволнового излучения невозмущенного Солнца следующие.

По наблюдениям на волнах 8 и 13 мм (РТ-22) и измерениям продольных магнитных полей (МП) в полярных областях Солнца (КГ-1) в августе-октябре 1974 г обнаружено: а) повышенное значение МП, достигавшее сотни гаусс; б) увеличение радиояркости на 2000-1500 К; в) повышение активности в виде вспышки и выбросов (Бабин и др., 1976).

Изучены радиоизображения Солнца в диапазоне 1.9-3.5 см. Отношение диаметра радиоизображения Солнца в направлении экватора к диаметру вдоль центрального меридиана возрастает с длиной волны и с уровнем солнечной активности (Бачурин и др., 1978).

На основании нескольких циклов наблюдений на волнах 1.9, 2.5 и 3.5 см и с привлечением литературных данных показано, что изменение яркостной температуры “спокойного” Солнца в СМ-диапазоне хорошо описывается простой эмпирической формулой. Обнаружена эллиптичность радиоизображения Солнца в диапазоне 1.9 ÷ 3.5 см. Большая ось эллипса направлена по солнечному экватору. Яркостная температура “спокойного” Солнца на волнах 1.9, 2.5, 3.15 и 3.5 см оказалась равной 9700 ± 500 , 10800 ± 500 , 12300 ± 600 и 13000 ± 700 К (Бачурин и др., 1974; 1976).

Определены яркостные температуры невозмущенного Солнца на волнах 8.1, 13.2 и 16.6 мм, которые оказались равными 7950 ± 500 ; 9700 ± 600 и 11750 ± 700 К. Яркостная температура шести ЛИ на этих волнах возрастает прямо пропорционально длине волны, а поток увеличивается с уменьшением длины волны (Ефанов, Моисеев, 1971). Совместно с австралийскими учеными исследованы полярные области Солнца на волнах 3.5, 8.0 и 13.5 мм. Найдено, что области повышенной яркости имеют эффективную температуру 270, 700 и 1400 К соответственно. Размеры областей в радиальном направлении на всех волнах в среднем составляют $1'.5 - 2'.0$ (Ефанов и др., 1980).

Рассмотрен способ измерения солнечного радиодиаметра, основанный на сравнении записей радиоизлучения слабозмущенного Солнца, полученных по наблюдениям при сканировании антенной солнечного диска, и расчетных кривых, построенных в предположении равномерного распределения радиояркости по диску. Величины радиодиаметра Солнца на волнах 1.9, 2.5 и 3.5 см согласуются с данными затменных наблюдений. Отношение солнечного радиорadiusа на этих волнах к оптическому радиусу составляет 1.019, 1.026 и 1.031 (по меридиану) и 1.032, 1.041 и 1.057 (по экватору) (Бачурин, 1982).

Измерен радиорadius Солнца в приполярных областях в 1980 и 1981 гг. на волнах 2.25 и 3.5 см. Показано, что радиорadius на этих волнах увеличился по сравнению с его значением в 1976 г. Увеличение среднего значения радиорadiusа составляет примерно 7×10^3 км на волне 2.25 см и 10^4 км на волне 3.5 см. Величина радиорadiusа на волне 2.25 см по меридиану составляет (1.035 ± 0.001) от оптического радиуса, в дальнейшем это значение уточнялось по результатам последующих наблюдений (Бачурин, 1983; 1984; 1986; 1987; 1988).

По результатам наблюдений полярных областей Солнца на волнах 0.32, 0.82, 1.35 и 2.25 см, выполненных в 1984–1985 гг., выявлено, что превышение яркостной температуры области у южного полюса над уровнем спокойного Солнца составляло 10, 14, 16 и 13 % соответственно. Сделан вывод, что радиояркость полярных районов на гелиоширотах больше 65 град, изменяется в течение 11-летнего цикла в противофазе с числами Вольфа (Моисеев, Нестеров, 1987).

Приведены результаты измерений радиодиаметра Солнца на ММ-волнах в околополярных направлениях. В период наблюдений 1979–1982 гг. не замечены изменения размеров диска, превышающие ошибки измерений. Средние значения отношений радиорadiusов к оптическому составили 1.0140 ± 0.0004 и 1.0159 ± 0.0003 на волнах 8.2 и 13.5 мм соответственно (Моисеев, Нестеров, 1991).

3 Локальные источники и всплески

Результаты исследования радиоизлучения солнечных активных областей и всплесков следующие.

Приведены результаты наблюдений поляризованного излучения ЛИ и всплесков на волне 3.15 см в июне-июле и октябре 1968 г. На основании анализа двух залимбовых областей найдено, что верхние границы образования поляризованного излучения располагаются на высотах 16×10^3 и

35×10^3 км над фотосферой. Впервые обнаружена смена знака поляризации во время солнечных всплесков. Обнаружено, что всплески возникали тремя отдельными путями. Степень поляризации изменялась от всплеска к всплеску. Общий ход степени поляризации для двух крайних путей напоминает квазипериодические процессы. Найдена связь между величиной степени поляризации радиоизлучения и жесткостью рентгеновского излучения во время солнечных вспышек (Ерюшев и др., 1971; Дворяшин и др., 1973).

По наблюдениям в августе 1972 г. на волнах 1.9, 2.5 и 3.5 см мощной группы пятен (ГП) на затухающей части мощного всплеска обнаружена последовательность слабых всплесков с периодом примерно 100 мин. Степень круговой поляризации в моменты максимумов этих всплесков, как правило, возрастала. (Бачурин и др., 1976).

По наблюдениям активной области (АО), связанной с ГП № 96, в период 1-7.07.1974 на трех волнах обнаружены изменения радиоизлучения со средним периодом 100 мин, на которые накладывались флуктуации радиоизлучения с периодом около 20 мин. Мощному всплеску 4.07.1974 г., связанному с протонной вспышкой, предшествовало уменьшение интенсивности излучения на всех волнах. Во время этого всплеска зарегистрированы квазипериодические колебания (КПК) радиоизлучения с периодом около 30 сек (Бачурин и др., 1977; 1979; 1980). Измерены плотности потоков 9-ти ЛИ на волнах 1.9, 2.5 и 3.5 см по наблюдениям в 1972–1973 гг. Отмечается, что плотность потока радиоизлучения ЛИ тесно связана с площадями ГП. Отмечены характерные изменения спектрального индекса в двух диапазонах и изменения степени круговой поляризации радиоизлучения, сопровождавшие изменения площади тени наибольшего пятна (Бачурин и др., 1974; 1976).

По кооперативным КраО-НИРФИ (Н.Новгород) исследованиям получены некоторые результаты наблюдений ЛИ солнечного излучения на волнах 2, 4, 6, 8, 13, и 17 мм. Ход частотного спектра источников в диапазоне 2-6 мм следует закону λ^{-2} . Источники являются оптически плотными и имеют тепловую природу. В интервале длин волн 6-17 мм характер спектра близок плоскому. В этом случае ЛИ могут быть как оптически прозрачными, так и оптически толстыми (Ефанов и др., 1972).

Совместно с ИРЭ АН СССР (г. Москва) получены результаты наблюдений солнечных активных областей на волнах 1.35, 1.76 и 8.0 мм. Сделано заключение, что на волнах 1.2-4.0 мм активные области излучают как тепловые оптически плотные источники (Ефанов, и др., 1973).

По наблюдениям поляризованного излучения биполярных областей на Солнце на волнах 8.0 мм и 13.5 мм показано, что их поляризованное излучение характеризовалось наличием максимума над хвостовой частью ГП в 30 град. к востоку от центрального меридиана (ЦМ) и над головной – при нахождении их на таком же расстоянии к западу. Смены знака поляризации ЛИ при прохождении их по диску Солнца не обнаружено. Степень круговой поляризации составляла 3-18 % (Ефанов, Моисеев, 1973; 1977).

Исследованы свойства (размеры, яркостные температуры, потоки) ЛИ радиоизлучения Солнца на волнах 0.8, 1.3 и 1.7 см. Угловые размеры ЛИ уменьшаются на всех волнах одинаково с увеличением их гелиошироты. Плотность потока ЛИ только на волне 8 мм уменьшается по мере удаления от ЦМ, а на волнах 13 и 17 мм она не зависит от гелиошироты (Ефанов и др., 1974).

Рассмотрено радиоизлучение протонных и не протонных областей на Солнце в диапазоне волн 1.9-3.5 см и всплесковая активность июльской 1974 г. протонной ГП. Для протонных областей характерно относительно высокое значение плотности потока радиоизлучения в этом диапазоне. При переходе от протонных областей к не протонным спектральный индекс в интервале волн 3.5-2.5 см уменьшается. Обнаружены характерные этапы в развитии ЛИ и его всплесковой активности на волне 1.9 см (Бачурин и др., 1980).

На материалах наблюдений солнечного радиоизлучения на волнах 1.9, 2.5 и 3.5 см (РТ-22 КраО) и волне 3.2 см (поляриметр СибИЗМИРа) исследованы динамические особенности тонкой структуры в спектре радиоизлучения всплесков. Обнаруженное различие в записях всплесков на волнах 3.2 и 3.5 см отражает наличие существенных градиентов в спектре радиоизлучения на начальной стадии развития некоторых сложных всплесков (Бачурин и др., 1983).

При наблюдениях на волнах 8.2 и 13.5 мм в 1979 г. были обнаружены новые типы источников

радиоизлучения, расположенные в короне Солнца на высотах более $(200 - 300) \times 10^3$ км от фотосферы. Эти источники оптически тонкие, их эффективные температуры достигают несколько тысяч кельвинов (Моисеев, Нестеров, 1986).

Совместно с сотрудниками ЛГУ (С.-Петербург) впервые проведены измерения, выполненные радиометодами, слабых магнитных полей в протуберанцах. Получено магнитное поле (МП) около 10 Гс (Апушкинский и др., 1990).

Реализованы одновременные измерения спектра излучения АО на волнах 8 и 13.5 мм и поляризованной по кругу составляющей на волне 13.5 мм. Показано, что АО в феврале 1990 г. была оптически тонкой на средней волне диапазона. Напряженность МП в ней превышала 200 Гс. Вычисленная по спектру и степени поляризации напряженность МП в 4-х источниках всплесков составила 330-1100 Гс (Моисеев и др., 1992).

Измерены характеристики 57 всплесков и ЛИ, в которых они произошли, на волнах 13 мм (I, V) и 8 мм (I). Степень круговой поляризации не превышала 35%, спектральные индексы заключены в пределах от -0.5 до -6.5 . Отмеченные свойства всплесков объясняются с помощью моделей неоднородных тепловых источников (Моисеев и др., 1993).

Проведены измерения спектра трех вспышечно-активных областей по наблюдениям 1989-1991 гг. на волнах 3.5, 2.8, 2.25 и 1.95 см. Оценены напряженности МП, которые оказались в интервале 300-700 Гс. Измерены характеристики 94 всплесков радиоизлучения. Степень круговой поляризации отдельных всплесков может достигать 90%. У 33% всплесков наблюдается явление инверсии знака поляризации радиоизлучения. В 10% случаев проявилась колебательная структура после импульсной фазы. Яркостные температуры непродолжительных (< 2 мин) всплесков с потоком ~ 20 с.е.п. равны $10^6 - 10^8$ К. Отмечено, что указанные свойства микроволновых всплесков (частотный диапазон 8.2-15.8 ГГц) можно интерпретировать с помощью моделей неоднородных тепловых источников (Гранат, Цветков, 1993).

Сравнительный анализ поляризованного радиоизлучения активных областей в диапазоне 1.9-3.5 см позволил отождествить симпатический всплеск с пульсациями от источника, отстоящего на расстоянии $> 4 \times 10^5$ км от места первичной вспышки. Динамические Фурье-спектры пульсаций радиоизлучения взаимодействующих АО содержали достоверные составляющие на частотах 0.029, 0.033 и 0.045 Гц, а также их вторые гармоники. Высказано предположение, что триггером симпатического всплеска послужил промодулированный по плотности поток энергичных (> 10 кэВ) электронов, которые двигались со скоростями $\sim 6 \times 10^4$ км/с внутри корональной магнитной арки, соединяющей эти две активные области (Баранов, Цветков, 1994).

По данным наблюдений 32 активных областей и более 220 всплесков показано, что параметры излучения как локальных источников, так и всплесков в интервале волн 8.0-13.5 мм зависят от напряженности МП в короне. В указанном интервале волн часто реализуется, видимо, ступенька яркостной температуры источников всплеска и активной области, связанная с коротковолновым обрезанием циклотронного спектра излучения (Нестеров, и др., 1995).

В кооперации КраО-НИРФИ проведены наблюдения радиоизлучения Солнца в период 1977-1989 гг. с высоким спектральным и временным разрешением в диапазонах 8-12 ГГц и 12-18 ГГц. Основные результаты следующие: выявлено наличие тонкой структуры спектра ЛИ радиоизлучения, установлен факт наличия и определены спектральные характеристики микроволновых предвестников, обнаружена узкополосная быстропеременная компонента излучения солнечных всплесков с полосой 2-3 ГГц и скоростью дрейфа 1-2 ГГц/с (Каверин и др., 1998).

4 Мелкоструктурные образования, наблюдения затмений

Пользуясь тем обстоятельством, что достаточно крупный инструмент РТ-22 иногда попадал в зоны затмений Солнца, наблюдения затмений позволяли получать максимально возможное угловое разрешение.

По наблюдениям затмения 22 сентября 1968 г. на волне 3.15 см (I, V) обнаружена тонкая структура источников поляризованного излучения: отдельные детали с размерами около $5''$. Размеры ЛИ в I и V практически совпадали. Определена верхняя граница для ЛИ поляризованного

излучения – 26×10^3 и для ЛИ в полной интенсивности – 42×10^3 км над фотосферой. Высота радиолимба равна 21×10^3 км (Ерьюшев, Цветков, 1972).

Проведены наблюдения затмения Солнца 29 апреля 1976 г. на волне 1.35 см в интенсивности и поляризованной по кругу составляющей излучения. ЛИ содержал 3 компоненты с размерами $8''$, $12''$ и $30''$, положения которых в I и V совпадали. Яркостные температуры $\sim 10^5$ в интенсивности и $\sim 10^3$ в поляризации (Домнин и др., 1978).

В результате наблюдений прохождения Меркурия по диску Солнца 9.05.1970 г. на волне 8 мм обнаружены неоднородности в спокойных и активных областях на Солнце с характерными размерами $1''.6 - 3''.4$ и $17 - 40''$. Отмечено, что меньшие значения неоднородностей близки к характерным размерам групп гранул, а большие – к характерным размерам супергранул. Температура больших элементов неоднородностей близка к температуре хромосферы ($10^4 K$), тогда как мелкие конденсации оказались более нагреты – до $(13 - 18) \times 10^3 K$. Это первый результат по исследованию солнечной радиогрануляции (Ефанов и др., 1975).

Рассмотрены результаты наблюдений затмения АО на Солнце на волне 1.35 см 15 декабря 1982 г. Показано, что а) угловые размеры ЛИ-ов в АО близки к размерам соответствующих им пятен и составляли $10'' - 14''$; б) в разрешенных компонентах яркостные температуры составляли $(1.6 - 5.3) \times 10^5 K$ (Моисеев, Нестеров, 1985).

Описана структура активной области NOAA 8662 по наблюдениям затмения Солнца 11.08.1999 г. Представлены предварительные результаты вычисления параметров радиоисточника на основе только радионаблюдений. Впервые измерены МП мелкоструктурных образований в переходной зоне и нижней короне Солнца, располагавшиеся над мелкими пятнами и порами. В одном из фрагментов имеется различие в распределении интенсивности и поляризованной составляющей излучения, что свидетельствует о наложении двух типов излучения (Будзиновская и др., 2000).

По результатам наблюдений частного солнечного затмения 11 августа 1999 года на волнах 3.5, 2.8, 2.3 и 2.0 см (I, V). Определены параметры источника, связанного с ГП NOAA 8662. Выделены четыре фрагмента источника с угловыми размерами $8'' - 24''$, яркостными температурами $10^5 - 10^6 K$ и магнитными полями 100-600 Гс. Сопоставление оптических и радиоданных показало, что размеры фрагментов источника в интенсивности и поляризованном излучении близки и совпадают с размерами полутеней мелких пятен (Бабин и др., 2001).

По наблюдениям солнечного затмения 31 мая 2003 г. на волнах 8.2 и 13.5 мм выявлены следующие свойства радиоизлучения: а) радиояркость короны на расстояниях 350 и 700 тыс. км от фотосферы на волнах миллиметрового диапазона одинакова с точностью 11 К; б) на диске Солнца обнаружен компактный радиоисточник с угловым размером $3''.36$ и яркостной температурой $3.18 \times 10^6 K$; в) над лимбом Луны во время затмения возникает область повышенной радиояркости, появление которой можно объяснить рефракцией радиоволн в слое околосолнечной плазмы высотой 12-20 км с электронной концентрацией в максимуме 10^3см^{-3} (Будзиновская и др., 2005).

5 Пульсации радиоизлучения Солнца

Одним из достоинств РТ-22 КрАО, оснащенного чувствительными радиометрами, является возможность измерений малых по амплитуде временных вариаций микроволнового излучения Солнца на фоне высокой антенной температуры от его диска.

Тщательно исследованы квазипериодические пульсации радиоизлучения протонной области на Солнце в июле 1974 г. на волнах 3.5, 2.5 и 1.9 см. Спектральный анализ радиоизлучения ЛИ подтвердил наличие составляющих с периодами 15-25 мин. Обнаружено, что в радиоизлучении этого ЛИ наблюдалась всплесковая активность, характеризующаяся квазипериодической последовательностью пульсаций со средней длительностью около 20 мин и средним периодом около 85 мин (Абраменко и др., 1982).

Иницированные А.Б. Северным ювелирные измерения радиоизлучения Солнца на сантиметровых длинах волн, выполненные в 1977-1978 гг, позволили обнаружить флуктуации относительной (центр-край) радиояркости с периодом 160 мин и амплитудой примерно 10^{-3} .

Они соответствуют изменениям яркостной температуры примерно на 10 К (Ерюшев и др., 1979). Выявлены колебания степени круговой поляризации радиоизлучения спокойного Солнца на волне 13.5 мм с периодом 160 мин и амплитудой 2×10^{-5} . Они происходят с запаздыванием на 34 мин относительно изменений лучевой скорости, наблюдаемых на уровне фотосферы, и связаны, по-видимому, с вариациями общего магнитного поля Солнца (Ефанов и др., 1983).

Описана наблюдательная программа, выполненная на РТ-22 с целью поиска колебаний радиояркости Солнца в диапазоне 1.9-3.5 см, сопутствующих глобальным колебаниям Солнца с периодом 160 мин. Результаты наблюдений 1977–1980 гг. показывают, что средняя амплитуда изменения радиояркости в указанном диапазоне соответствует периодическим колебаниям дифференциальной (центр-край) яркостной температуры спокойного Солнца примерно $\pm 3K$. Сравнение радионаблюдений с наблюдениями лучевой скорости Солнца показывает, что колебания радиояркости, по-видимому, запаздывают относительно колебаний лучевой скорости примерно на 12 мин (Цветков, 1982).

Изучены колебания степени поляризации радиоизлучения ЛИ, наблюдавшегося на РТ-22 в период 1-7.07.1974 г. На основании анализа спектров мощности вариаций степени поляризации радиоизлучения делается вывод, что в исследуемых процессах есть достоверные периоды, заключенные в интервалах (351-345), (330-220) и (160-60) мин. В предположении магнитно-тормозного механизма излучения сделана оценка возможных изменений МП в нижней короне над АО на Солнце (Абраменко, Цветков, 1984).

По наблюдениям поляризованного радиоизлучения ЛИ группы пятен СД № 401 изучена динамика спектров мощности колебаний ЛИ при прохождении ГП по диску Солнца. Показано, что колебательные процессы как в полной интенсивности, так и в поляризованном излучении развиваются и затухают за время порядка 0.5-1.0 сут. Появление вторичной модуляции колебаний с периодами 2-6 мин объясняется прохождением пакета МГД-волн через корональную конденсацию (Абраменко, Цветков, 1985).

Проанализированы данные прямых измерений яркости в пяти невозмущенных участках Солнца, полученные в 1980-1982 гг. на волнах 8.2 и 13.5 мм. Данные наблюдений свидетельствуют о наличии колебаний интенсивности излучения с периодом 160.01 мин со средней амплитудой около 10^{-3} яркостной температуры спокойного Солнца на обеих волнах. Максимум яркости соответствует моменту, когда, согласно оптическим данным, радиус Солнца принимает максимальное значение (Нестеров, 1985).

Рассмотрены результаты дифференциальных (центр-край) измерений радиоизлучения спокойного Солнца на волне 2.25 см, выполненные в 1978-1984 гг. В средних спектрах мощности флуктуаций радиояркости обнаружено 12 доминирующих пиков в интервале периодов 400-70 мин, не связанных со скважностью рядов наблюдений. Шесть из них по значению периода близки к периодам пульсаций лучевой скорости, достоверно выделенных по данным оптических наблюдений в Крыму и в Станфорде. Средняя амплитуда этих колебаний соответствует относительным изменениям яркостной температуры спокойного Солнца на $\pm(10 - 3)K$ (Цветков, 1986).

Проанализирован спектральный состав колебаний поляризованного излучения шести ЛИ на волне 2.25 см по наблюдениям в 1980-1982 и 1985-1986 гг. Средние спектры мощности колебаний радиоизлучения свидетельствуют о существовании многомодовых колебаний, содержащих стабильные частоты. Средняя амплитуда колебаний радиояркости Солнца с периодами около 5 мин соответствует изменениям яркостной температуры спокойного Солнца на $\pm 0,7K$, а для периодов около 3 мин эти изменения составляют около $\pm 0,3K$. Амплитудные соотношения колебаний свидетельствуют об усилении (3-5)-минутных колебаний в радиоизлучении активной области. Обсуждается предположение о частичном возбуждении колебаний диапазона 2.6-4.0 мГц на собственных дискретных модах солнечного атмосферного резонатора. Слабая зависимость средней амплитуды колебаний от положения ЛИ на диске Солнца обусловлена, по-видимому, широким углом раскрытия зоны модуляции солнечного микроволнового излучения (Цветков, Тарасова, 1988; Цветков, 1990).

Исследована динамика МГД-колебаний по наблюдениям солнечной активной области NOAA 0119 23 сентября 2002 г. в диапазоне длин волн 2.0-107 см на РТ-22, РТ-3 и РТМ. С помощью

вейвлет-анализа выяснено, что колебания интенсивности происходили во всем диапазоне длин волн. В интервале времени приблизительно с 9:00 UT по 10:53 UT наибольшую амплитуду имели колебания с периодом 970 с. Фаза колебаний имела систематические сдвиги противоположного знака на коротких и длинных волнах относительно граничной длины волны 10.5 см. Это рассматривается как признак возникновения возмущения на высоте генерации дециметрового излучения и его распространения одновременно вверх и вниз (Будзиновская и др., 2004).

С помощью специально разработанного алгоритма вейвлет-анализа динамических систем исследованы записи радиоизлучения Солнца на волнах 2.0, 2.3 и 3.5 см, полученные 7 октября 2002 г. Измерена эффективная температура излучающей области, определена высота расположения источников радиоизлучения на этих волнах. Вейвлет-анализ позволил установить, что колебания с периодом 1750 с на более длинной волне 3.5 см запаздывают на 78 сек относительно колебаний на волне 2.0 см. Показано, что такое запаздывание характерно для распространяющихся в солнечной атмосфере акустических волн (Цветков, Юровский, 2005).

6 Крупномасштабные образования, наблюдения корональных дыр

Угловое разрешение РТ-22 КрАО, составляющее в диапазоне 0.3-3.5 см $40'' - 360''$, позволяет достаточно уверенно выделять крупномасштабные образования на диске Солнца.

Исследовано радиоизлучение Солнца в период минимума солнечной активности (2-12.11.1976). Установлена связь радиоизлучающих областей с флоккулами и слабыми (< 20 Гс) холмами магнитного поля. Превышение усредненных по источнику яркостных температур этих областей над уровнем спокойного Солнца равно в среднем 490, 280 и 190 К на волнах 3.5, 2.5 и 1.9 см (Бачурин и др., 1981).

С коллегами из НИРФИ по наблюдениям на волне 3.3 мм изучен пространственный спектр радиогрануляции Солнца. Показано, что радиогрануляционная структура масштаба $90'' - 60''$ наилучшим образом проявляется вдоль линии инверсии МП. Согласно нашим измерениям яркостная температура радиогрануляционных образований масштаба $60'' - 90''$ порядка (20-40) К, а для образований масштаба $100'' - 500''$ порядка (150-200) К. Проведено качественное сопоставление радиогрануляции с сеткой хромосферных МП (Кисляков и др., 1993).

По результатам наблюдений Солнца с помощью 4-х волнового поляриметра в период 10-11 июля 1999 г., предшествующий затмению Солнца, построены радиокарты Солнца на четырех волнах в полной интенсивности и поляризации. Проведено сопоставление радиоисточников с оптическими образованиями. Выполнены некоторые оценки физических параметров в областях повышенной радиояркости (Баранов, Цветков, 1992).

Представлены результаты наблюдений в апреле 1993 г. двух солнечных корональных дыр (КД) на волнах 2.2, 2.8 и 3.5 см. Отождествление КД проводилось по данным японского спутника YOH-KOH. Проведен совместный анализ гармонических составляющих пульсаций в интервале периодов 20-80 мин. Соотношения амплитуд и частот гармоник в средних спектрах дают некоторые основания предполагать, что модуляция радиоизлучения КД происходит в основном в четырех зонах спектра с периодами максимальных по амплитуде колебаний 70.76, 54.88, 45.31 и 36.71 мин. В другом диапазоне распределяются их гармонические обертоны и комбинационные гармоники со значением периодов 31, 28 и 22 мин (Цветков, и др., 1997).

На основе трех каталогов радиоизображений Солнца на четырех волнах СМ-диапазона обсуждены результаты наблюдений в 1990-1998 гг. крупномасштабных образований, проявляющихся в виде радиодепрессий сантиметрового излучения на фоне уровня спокойного Солнца. Проведено отождествление радиодепрессий с корональными дырами и волокнами, для которых получены спектры радиояркости. Показано, что наши наблюдения соответствуют модели Лантоса (1978). Так же подтверждается связь радиодепрессий с 11-летним циклом солнечной активности (Будзиновская, Цветков, 2002).

Что касается радиоизображений Солнца в поляризации, то наиболее интересным результатом (R-, L-распределение) является обоснование нового критерия солнечной активности (Цветков, 1998).

7 Интерпретация результатов наблюдений

По полученным на РТ-22 сведениям о солнечном микроволновом излучении проведен подробный анализ и интерпретация некоторых событий и явлений в солнечной активности.

Совместно с финскими учеными проанализированы более 900 радиокарт Солнца, полученных в течение ряда лет в ММ-диапазоне длин волн. Рассмотрены свойства источников S-компоненты и долгоживущих источников в короне. Определены физические параметры, высоты генерации в солнечной атмосфере и механизм эмиссии этих образований (Урпо и др., 1988).

Изучена временная структура вариаций радиоизлучения на волне 3.3 мм по наблюдениям в течение 1987–1991 гг. Приведены доказательства существования пульсаций радиояркости с частотой повторения около 5 Гц. В вариациях радиоизлучения флоккулов, групп пятен и супергранул обнаружен ряд дискретных модуляционных частот, наиболее стабильные из которых имеют значения периодов 244 и 189 с. Спектральный состав пульсаций интерпретируется как спектр биений продольных мод хромосферного резонатора типа эталона Фабри-Перо. В соответствии с моделью хромосферы (Урпо и др., 1988) рассчитана скорость медленных акустических волн, которая оказалась равной 10–40 км/с (Кисляков и др., 1990; 1996).

На примере двух событий, 2 и 12 ноября 1988 г., проиллюстрированы диагностические возможности 4-х волнового поляриметра. По характеристикам колебательной структуры всплеска 2.11.88 г. оценена плотность, температура эруптивной вспышечной плазмы и среднее МП вспышечной петли. Последовательность всплесков 12.11.88 г. может быть вызвана колебаниями протуберанца, что дает возможность вычислить температуру активной области ($\sim 2,4 \times 10^6$) К (Гранат и др., 1991).

Совместно с САО РАН (Пулково) проанализировано соотношение потоков мягкого рентгеновского и миллиметрового излучения солнечных вспышек с учетом данных о форме радиоспектра. Для таких вспышек определено отношение мер эмиссий в миллиметровом и рентгеновском диапазонах. На примере избранных событий проиллюстрированы возможности диагностики вспышечной плазмы по миллиметровому и рентгеновскому излучению (Нестеров и др., 1998).

Проведен анализ микроволнового, рентгеновского и ультрафиолетового излучения солнечной вспышки “Бастилия” 14.07.2000 г. на основе наблюдательных данных, полученных с помощью РТ-22 КраО, а также орбитальных станциях Yohkoh, SOHO и TRACE. Показано, что обнаруженная смена знака круговой поляризации микроволнового излучения связана со смещением источника ускоренных электронов из западной части активной области в восточную. Особенности поведения временных профилей жесткого рентгеновского и микроволнового излучения обсуждаются в рамках модели коронального пробкотрона (Копылова и др., 2002).

На основе наблюдательных данных, полученных в сентябре 2001 г. на частотах 8.6 и 15.4 ГГц, методами вайвлет-анализа исследованы квазипериодические вариации микроволнового излучения Солнца. Выявлены пульсации с периодами 10–40 с, которые предположительно связаны с альвеновскими волнами. В рамках однородной модели проведен анализ влияния акустических и альвеновских осцилляций на тепловой механизм микроволнового излучения. Обсуждаются вероятные источники нагрева солнечной короны (Гельфрейх и др., 2003; 2004).

Изучены временные характеристики и пространственные особенности 4-х ЛИ радиоизлучения, располагавшихся в короне над активными областями по кооперативным наблюдениям на РТ-22 КраО, РАТАН-600 и ССРТ. Рассмотрена структура и динамика ЛИ-ов, а также их связь с квазипериодическими процессами на Солнце. Сделана попытка объяснить особенности микроволновых пульсаций скачкообразной перестройкой короны над пятном, которая привела к возбуждению МГД-колебаний 07.10.2002 г. (Гельфрейх, и др., 2004).

Проведены исследования динамики и структуры активной области NOAA 0139 на основе наблюдательных данных, полученных в микроволновом диапазоне на РТ-22 КраО, ССРТ и РАТАН-600, а также космических орбитальных станций SOHO (MDI) и TRACE. С помощью методов вейвлет-анализа показано, что наблюдаемая депрессия микроволнового излучения могла быть вызвана уменьшением числа и мощности микровспышек. Более ярко выраженная депрессия

излучения на коротких длинах волн объясняется уменьшением потоков ускоренных электронов, ответственных за нагрев переходной области и верхней хромосферы Солнца. Полученные результаты свидетельствуют о существенном вкладе в нагрев солнечной короны элементарных вспышечных событий (Цап и др., 2005).

В приближении двухслойной модели с учетом стратификации атмосферы рассмотрена возможность проникновения альвеновских и акустико-гравитационных волн из хромосферы в корону Солнца. Показано, что для высокочастотных альвеновских волн с периодами меньше нескольких десятков секунд коэффициент прохождения $T \approx 0.3$, тогда как для акустико-гравитационных волн вблизи частоты акустической отсечки $T \rightarrow 1$. Данные оценки хорошо согласуются с результатами наблюдений, полученными на РТ-22 НИИ “КрАО”, а также на космических орбитальных станциях (Цап и др., 2005).

8 Заключение

Наиважнейшими результатами, на наш взгляд, являются: проведение уникальных поляризационных наблюдений затмений Солнца, исследования спектров радиоизлучения спокойного Солнца и всплесков в диапазоне 1.35 мм-3.5 см, первые результаты по радиогрануляции, поиск и отождествление глобальных колебаний Солнца по радиоданным, изучение связи распределения радиояркости с магнитными полями на уровне фотосферы, определение физических параметров переходной области хромосфера-корона, разработка новых критериев прогноза солнечной активности и методов диагностики солнечной плазмы.

В заключение следует особо отметить, что планируемое оснащение РТ-22 НИИ “КрАО” современной радиометрической аппаратурой нового поколения позволит на высоком научно-техническом уровне проводить исследования солнечной активности как в рамках Международного Гелиофизического Года (2007), так и в последующие годы.

Обзор составлен по публикациям в Известиях Крымской Астрофизической Обсерватории (том 38, 1967 г. – том 100, 2004 г.), а также по публикациям в журналах “Письма в АЖ”, “Кинематика и физика небесных тел”, “Астрономический журнал” и “Solar Physics”. При подготовке статьи были использованы аннотированные библиографические указатели работ сотрудников отдела радиоастрономии КрАО, составленные Ставицкой В.С.

Автор выражает благодарность Ю.Ф. Юровскому за прочтение обзора и полезные замечания, а так же Шликать Г.Н. за подготовку рукописи к печати.