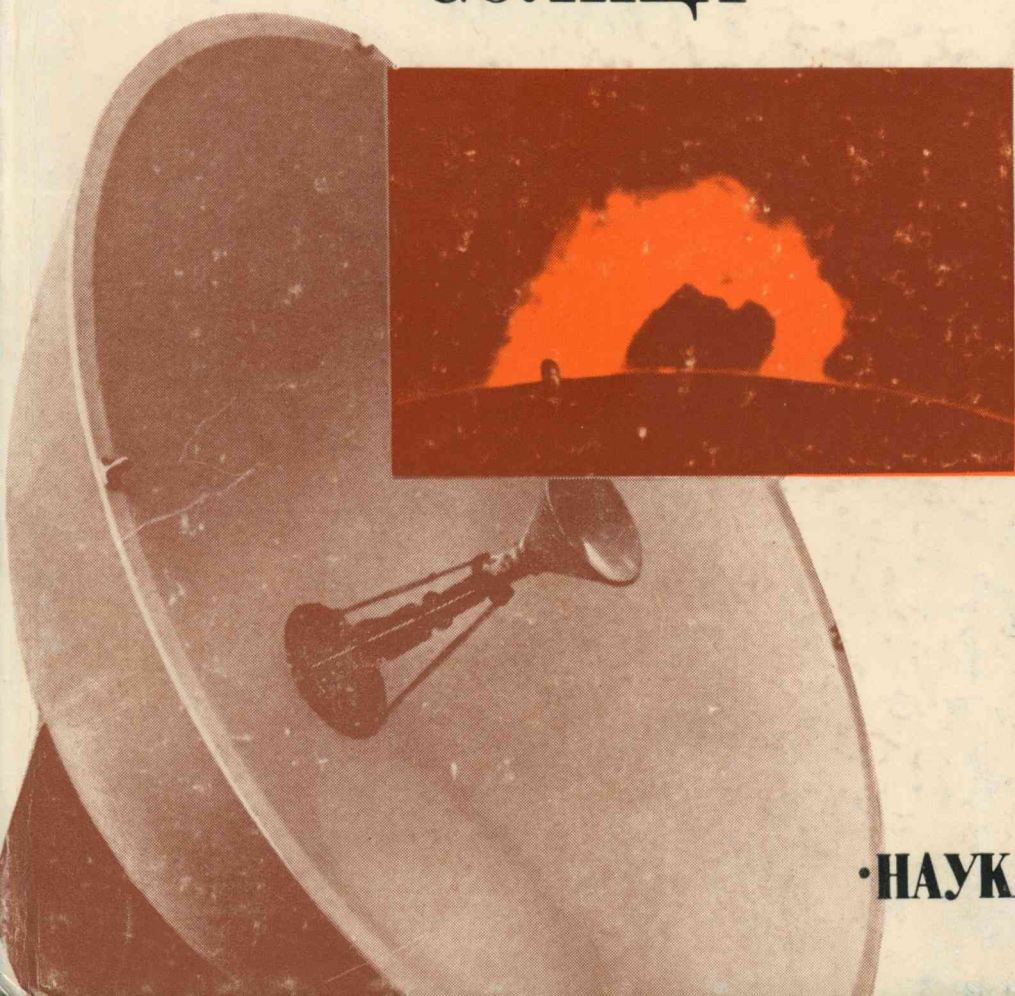


СОВЕТСКИЕ РАДИОТЕЛЕСКОПЫ И РАДИО- АСТРОНОМИЯ СОЛНЦА



• НАУКА •

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

НАУЧНЫЙ СОВЕТ ПО ПРОБЛЕМЕ "РАДИОАСТРОНОМИЯ"

Сибирский институт земного магнетизма, ионосферы
и распространения радиоволн

СОВЕТСКИЕ РАДИОТЕЛЕСКОПЫ И РАДИО- АСТРОНОМИЯ СОЛНЦА

Ответственные редакторы:

доктор физико-математических наук *А.Е. Саломонович*,

доктор технических наук *Г.Я. Смольков*



МОСКВА "НАУКА"

1990

Авторы:

В.А. АЛЕКСЕЕВ (гл. 3), Г.Б. ГЕЛЬФРЕЙХ (гл. 4), В.В. ЗАЙЦЕВ (гл. 4),
Ю.П. ИЛЯСОВ (гл. 1), Н.Л. КАЙДАНОВСКИЙ (гл. 1), Л.И. МАТВЕЕНКО (гл. 2),
А.В. МЕНЬ (гл. 1), А.П. МОЛЧАНОВ (гл. 4), А.В. СТЕПАНОВ (гл. 4),
В.И. ШИШОВ (гл. 5)

Советские радиотелескопы и радиоастрономия Солнца / Г.Б. Гельфрейх, В.В. Зайцев, Ю.П. Илясов и др. — М.: Наука, 1990. — 212 с. — ISBN 5-02-000765-X.

В монографии описаны уникальные советские радиотелескопы различного типа и назначения, а также отражен вклад советских ученых в исследования радионизлучения Солнца и межпланетной среды радиоастрономическими методами. Авторами книги являются ведущие специалисты страны в области радиотелескопостроения, физики Солнца и межпланетной плазмы.

Книга предназначена для научных работников и инженеров — специалистов по астрофизике, радиоастрономии, геофизике и радиотехнике. Она будет полезной преподавателям и студентам высшей и средней школы.

Табл. 7. Ил. 67. Библиогр.: 507 назв.

Soviet radio telescopes and solar radio astronomy / G.B. Gelfreikh, V.V. Zaitsev, Yu.P. Ilyasov et al. — Moscow: Nauka, 1990. — 212 p. — ISBN 5-02-000765-X.

The unique soviet radio telescopes of different types and appointments are described in this monograph. Contributions of soviet investigators in solar radio astronomy and interplanetary plasma radio astronomy study are considered as well. The authors of the book are leading soviet experts of radio telescopes, solar physics and interplanetary plasma.

The book is intended for scientists and engineers concerned with astrophysics, radio astronomy, geophysics and radio technique. It will be useful for teachers and students of universities and colleges and available for school pupils.

Tables 7. Il. 67. Bibliogr.: 507 ref.

Рецензенты: Э.Л. Афраимович, В.Д. Урбанович, Р.Л. Сороченко

ПРЕДИСЛОВИЕ

Предлагаемая вниманию читателей коллективная монография "Советские радиотелескопы и радиоастрономия Солнца" является третьей, заключительной публикацией цикла, посвященного истории развития и основным результатам отечественной радиоастрономии начиная с 1946 г., т.е. более чем за 40-летний период. Этот цикл создан по инициативе Научного совета по проблеме "Радиоастрономия" и его председателя — академика В.А. Котельникова.

Необходимость публикаций такого рода связана с тем, что вклад советских ученых и инженеров в радиоастрономию — одну из наиболее динамично развивающихся отраслей фундаментальной и прикладной науки — весьма велик, но не всегда достаточно объективно освещается. Кроме того, с послевоенного времени, когда были сделаны первые шаги в нашей радиоастрономии (фактически это совпало с бурным развитием этой отрасли и в других странах), прошло много лет, выросли по крайней мере два и даже три поколения радиоастрономов. Поэтому представлялось важным осветить пройденный путь, чтобы объективно оценить итоги и наметить перспективы.

Известно, что ныне в диапазоне радиоволн получают исключительно важную информацию для астрофизики, астрометрии, космологии, лунно-планетной, солнечной астрономии и др. Освоение радиодиапазона для исследований космического пространства во многих отношениях позволило ставить и с успехом решать принципиально новые задачи, в большей степени недоступные наземной оптической астрономии.

Успешное развитие радиоастрономии потребовало создания нового класса астрономических инструментов — радиотелескопов, а также систем, состоящих из двух или нескольких радиотелескопов, так называемых радиоинтерферометров. С помощью радиоинтерферометров удается получать рекордную, практически недостижимую для оптических телескопов пространственную разрешающую способность. Предельные возможности радиоинтерферометров, в которых независимые записи получают на отдельных радиотелескопах при их синхронизации с помощью "атомных часов", ограничиваются лишь расстоянием между ними, т.е. размерами земного шара. Успехи космической техники, позволившей выносить один или более радиотелескопов в околоземное или даже в окосолнечное пространство, способствуют дальнейшему развитию методов радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами.

Создание для фундаментальной науки — астрономии — новых технических средств — радиотелескопов и радиointерферометров, оснащенных высокочувствительными приемными устройствами и средствами автоматизации, помимо получения данных, важных для самой астрономии, как и следовало ожидать, обеспечило решение многих научных и прикладных задач в смежных отраслях: в геофизике и физике атмосферы; прикладной астрометрии и геодезии и др.

Настоящая монография, как указано выше, завершает цикл из трех публикаций. В первой из них (Очерки истории радиоастрономии в СССР. Киев: Наук. думка, 1985. 280 с.) показаны создание и становление радиоастрономических центров и отражены основные этапы радиоастрономических исследований в СССР. Следующая книга (Развитие радиоастрономии в СССР. М.: Наука, 1988. 222 с.) была посвящена галактической и метagalacticкой астрономии, космической радиоспектроскопии, лунной и планетной радиоастрономии, радиолокации планет, прикладной радиоастрономии, ее связям с космологией и решением проблемы поисков внеземных цивилизаций. Такие важнейшие направления, как солнечная радиоастрономия и радиотелескопостроение, вошли в настоящую монографию. Она также написана крупными советскими специалистами, активно работающими в соответствующих областях, в ней рассмотрены советские радиотелескопы; методы радиointерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ); проблемы применения РСДБ в астрономии и геодинاميке; результаты исследований радиоизлучения Солнца и окосолнечного пространства.

Таким образом, настоящая книга вместе с упомянутыми выше публикациями дают, как мы полагаем, достаточно полное изложение истории развития советской радиоастрономии. Главы книги снабжены обширной библиографией, что позволяет ознакомиться с оригинальными работами.

Авторы выражают признательность советским ученым, в первую очередь А.А. Пистолькорсу, Б.В. Сомову, О.И. Яковлеву и Э.Л. Афраймовичу, которые ознакомились с разделами рукописи и сделали ценные замечания.

Много сил и здоровья было вложено одним из ее ответственных редакторов, доктором физико-математических наук А.Е. Саломоновичем в создание этой монографии, в ее редактирование и работу с авторами. К большому огорчению, увидеть ее вышедшей в свет ему не довелось: он скоропостижно скончался в те дни, когда книга уже редактировалась в издательстве "Наука". Светлая память об А.Е. Саломоновиче, пионере советской радиоастрономии, талантливом специалисте и отзывчивом добром человеке, навсегда сохранится у авторов этой монографии.

Г.Я. Смольков

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ СОКРАЩЕНИЙ НАЗВАНИЙ. УЧРЕЖДЕНИЙ

АО ЛГУ — Астрономическая обсерватория Ленинградского государственного университета

БАО — Бюраканская астрофизическая обсерватория АН АрмССР

ВНИИРИ — Всесоюзный научно-исследовательский институт радиотехнических измерений

ГАИШ — Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга Московского государственного университета

ГАО — Главная астрономическая обсерватория АН СССР (г. Пулково)

ГИФТИ — Государственный исследовательский физико-технический институт (г. Горький)

ИЗМИРАН — Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн АН СССР

ИКИ — Институт космических исследований АН СССР

ИМБП — Институт медико-биологических проблем Минздрава СССР

ИПФАН — Институт прикладной физики АН СССР (г. Горький)

ИПГ — Институт прикладной геофизики Госкомгидромета СССР

ИРЭ АН СССР — Институт радиотехники и электроники АН СССР

ИРЭ АН УССР — Институт радиофизики и электроники АН УССР

ИТА — Институт теоретической астрономии АН СССР

КрАО — Крымская астрофизическая обсерватория АН СССР

ЛГУ — Ленинградский государственный университет

МВТУ — Московское высшее техническое училище им. Н.Э. Баумана

НИРФИ — Научно-исследовательский радиофизический институт (г. Горький)

НИИФ ЛГУ — Научно-исследовательский институт физики ЛГУ

ОКБ МЭИ — Особое конструкторское бюро Московского энергетического института

РИАН УССР — Радиоастрономический институт АН УССР (г. Харьков)

САО — Специальная астрофизическая обсерватория (ст. Зеленчукская)

СибИЗМИР — Сибирский институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн Сибирского отделения АН СССР (г. Иркутск)

ФИАН — Физический институт им. П.Н. Лебедева АН СССР

ЦДКС — Центр дальней космической связи

I. СОВЕТСКИЕ РАДИОТЕЛЕСКОПЫ И РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТРЫ

Глава 1

СОВЕТСКИЕ РАДИОТЕЛЕСКОПЫ

Введение

Столетиями астрономы вели наблюдения только оптическими средствами. В наши дни астрономия стала всеволновой. Исследования всего многообразия небесных объектов ведутся ныне с использованием широчайшего диапазона электромагнитного спектра — от самых длинных радиоволн до самых коротких гамма-лучей.

Наш соотечественник, профессор Московского университета А.Г. Столетов, одним из первых догадывался о возможности существования радиоизлучения космической природы. На лекции "Эфир и электричество" прочитанной на VIII съезде естествоиспытателей и врачей 8 января 1890 г., он сказал: "Нет ли в спектре Солнца лучей с большей длиной волны, вроде герцевых лучей? Весьма возможно, что есть, что Солнце шлет к нам лучи, лежащие далеко за пределами инфракрасного спектра, не производящие заметного нагревания, но способные действовать электромагнитно" [1]. В 1894 г. английский естествоиспытатель О. Лодж также выдвинул предположение, что Солнце излучает и за пределами видимого света. Он сделал попытку обнаружить радиоизлучение Солнца. Однако, не найдя экспериментального подтверждения, он справедливо посчитал, что невидимое излучение слабо и для его обнаружения необходима достаточно высокая чувствительность приемников [2]. Более чем 30 лет спустя американский радиофизик К. Янский при изучении условий радиосвязи на волнах порядка 15 м обнаружил странный тип шумовых помех. В результате тщательных исследований он установил к 1933 г., что это "мешающее" излучение приходит от Млечного Пути и его интенсивность повышается по направлению на центр Галактики.

Первый радиотелескоп¹ специально для радионаблюдений небесных объектов был построен в 1937 г. радиоинженером Г. Ребером на собственные средства. Впервые для радиоастрономических наблюдений был использован параболический рефлектор диаметром 9,5 м. Начав проводить наблюдения на длине волны 9 см, Ребер затем увеличил рабочую длину волны и наконец, дойдя до волны длиной 1,9 м, получил важные наблюдательные

¹Условимся в дальнейшем называть радиотелескопом систему, состоящую из антенны того или иного типа, соединенную с чувствительным приемником (радиометром или приемной системой) и ЭВМ.

данные. Он построил первую карту распределения радиояркости вдоль Млечного Пути. Кроме пика излучения в направлении на центр Галактики, он обнаружил увеличение радиоизлучения в направлении на созвездия Лебедя и Кассиопеи [2].

Вторая мировая война приостановила работы по радиоастрономии. В это время стала быстро развиваться радиолокация как важное направление новой техники. И именно на радиолокационной станции в Англии Дж. Хей в 1942 г. экспериментально обнаружил радиоизлучение Солнца на длинах волн 4 и 8 м. Во второй половине 1942 г. наблюдения Дж. К. Саутворта в США подтвердили существование радиоизлучения Солнца и на сантиметровых волнах. Радиолокационная техника, ее крупные антенные системы и высокочувствительные приемники в первые послевоенные годы во многом способствовали развитию радиоастрономии.

Наблюдения космических источников электромагнитного излучения радиометодами с поверхности Земли, как известно, можно вести в атмосферном "радиоокне". Из-за ионосферы в зависимости от ее состояния наблюдения проводятся главным образом на волнах короче 15–20 м. Атмосфера, особенно тропосфера, сильно проявляется в исследованиях на волнах миллиметрового диапазона. Успешные регулярные наблюдения возможны на длинах волн вплоть до 8 мм и в небольших полосах в диапазоне 1–4 мм. Поглощение радиоволн молекулами водяного пара, кислорода, озона и других газов сильно ухудшает чувствительность в наблюдениях на миллиметровых волнах.

Использование космических аппаратов для наблюдений позволило обойти указанные выше трудности и использовать участки электромагнитного спектра от наиболее длинных радиоволн вплоть до рентгеновских и гамма-лучей. Астрономы теперь действительно могут получать информацию об излучении космических объектов во всем диапазоне частот. Если видимая область спектра занимает от 3000 до 7000 Å (немногим более октавы), то один только радиодиапазон перекрывает область длин волн, отличающихся в 10–20 тыс. раз. Поэтому не случайно за сравнительно короткое время были сделаны фундаментальные открытия: обнаружены квазары, реликтовый фон, пульсары, рентгеновские источники, "черные дыры", сверхкорона Солнца, сложные молекулы межзвездного вещества, возбужденные до высоких уровней атомы, ряд фундаментальных процессов, свидетельствующих о мощных энерговыделениях, сверхсильных магнитных полях, выбросах материи в космических масштабах и другие явления. Радиолокационная астрономия, использующая отраженные радиоволны, принесла принципиально новые данные о планетах нашей Солнечной системы.

Подавляющее большинство астрономических объектов находится на огромных расстояниях от земного наблюдателя. Самый ближайший объект — Луна удалена на расстояние порядка 400 тыс. км. Среднее расстояние от Земли до Солнца равно 150 млн км (1 а.е.). Расстояние же до наиболее удаленных видимых квазаров и радиогалактик оценивается в несколько миллиардов световых лет. К земному наблюдателю доходит чрезвычайно слабый поток электромагнитного излучения от космических объектов, несмотря на гигантские генерируемые мощности происходящих на них процессов, природа которых даже часто еще и неизвестна. В радио-

астрономии спектральная плотность потока радиоизлучения S измеряется в единицах, названных в честь первооткрывателя космического радиоизлучения Янского — Ян. Принято, что

$$S = 1 \text{ Ян} = 10^{-26} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{Гц}).$$

Полная спектральная плотность радиоизлучения невозмущенного Солнца, одного из самых радиоярких объектов на небе, составляет $3 \cdot 10^{-18} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{Гц})$ ($3 \cdot 10^8 \text{ Ян}$) на длине волны 1 мм и падает до $3 \cdot 10^3 \text{ Ян}$ на длине волны 1 м. Принять и подвести ко входу приемного устройства достаточный по мощности сигнал могут лишь антенны с большой собирающей эффективной площадью $A_{\text{эф}}$. Очевидно, из-за того, что, как правило, приемная система может регистрировать излучение лишь одной поляризации, принятая спектральная плотность мощности P , Вт/Гц неполяризованного излучения равна

$$P = A_{\text{эф}} \cdot S/2. \quad (1.1)$$

Иногда эту мощность характеризуют антенной температурой T_a , т.е. температурой согласованного с приемником нагретого и потому шумящего сопротивления антенны, выделяющего такую же спектральную плотность мощности шумов, т.е.

$$kT_a = A_{\text{эф}}S/2, \quad (1.2)$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$ — постоянная Больцмана. Понятна целесообразность введения величины T_a , поскольку прием радиоастрономических сигналов происходит в присутствии тепловых шумов, определяемых фоновым излучением небесной сферы, атмосферы и поверхности Земли, попадающих в антенную систему, а также тепловыми шумами собственно антенны и приемной системы. Шумовая мощность характеризуется шумовой температурой системы $T_{\text{ш}}$. Очевидно, что эта величина принципиально определяет чувствительность радиоастрономической системы.

Как уже отмечалось, астрономические объекты удалены на огромные расстояния, поэтому, несмотря подчас на большие физические размеры, их угловые размеры, видимые с Земли, находятся в пределах от десятков угловых минут до тысячных долей угловых секунд и даже меньше. В радиоастрономии, как и в остальных областях астрономии, чтобы вести результативные исследования различных объектов Вселенной, необходимо высокое угловое разрешение. Как хорошо известно, разрешающая способность в принципе определяется отношением максимального размера апертуры инструмента к рабочей длине волны. Поскольку радиоволны намного длиннее волн видимого света, то для получения высокой разрешающей способности приходится сооружать радиотелескопы во много раз больших размеров, чем оптические.

В принципе современный радиотелескоп, как упоминалось выше, состоит из приемной антенны (или многоантенной системы), иногда называемой собственно радиотелескопом, приемно-регистрирующей аппаратуры (или для краткости радиометра) и ЭВМ, управляющей процессом наблюдений, собирающей и обрабатывающей наблюдательную информацию. Все три компонента являются сложными техническими устройствами. Как правило, разрешение и во многом чувствительность инструмента определяются

антенными системами. В этой главе будут рассматриваться главным образом такие системы, названные для краткости изложения радиотелескопами. Следует заметить, что в настоящее время немалая стоимость радиотелескопов определяется затратами на сооружение антенных систем, их оснащение и обслуживание. Различные типы радиотелескопов и теория их работы достаточно полно изложены в монографиях [3—5], где читатель может найти классификацию радиотелескопов и определения их основных характеристик. Радиотелескопы делятся на два больших класса: 1) с заполненной и 2) незаполненной апертурой.

Инструменты первого класса (с заполненной апертурой) собирают волны подобно оптическим рефлекторным или рефракторным телескопам [6, 7]. Они могут иметь рефлекторы сферической, параболической (или близкой к ним) формы или антенную решетку из вибраторов, спиралей или других простых излучателей, соединенных фидерной и фазирующей системами. Разрешающая способность таких радиотелескопов, как правило, умеренная даже при больших эффективных площадях.

Высокие разрешающие способности были получены в радиоастрономии с помощью главным образом радиотелескопов с незаполненной апертурой [3, 4]. В основе их работы лежит использование двух или более разнесенных антенных элементов или систем, сигналы от которых собираются по линиям связи самого различного вида (вплоть до спутниковых каналов) и подвергаются корреляционной обработке для формирования отклика на радиоизлучение исследуемого объекта. В радиотелескопах с незаполненной апертурой диаграммой направленности часто называют отклик инструмента по мощности на прохождение точечного источника. Она связана обратным преобразованием Фурье с передаточной функцией телескопа по пространственным частотам [3].

Рекордно высокие разрешения достигнуты с помощью радиоинтерферометров со сверхдлинными базами (РСДБ) с двумя антеннами и более, впервые предложенными советскими учеными (см. следующую главу). Прием в пунктах расположения антенн таких систем ведется с использованием высокостабильных квантовых стандартов частоты в качестве гетеродинов и часов. Обработка данных наблюдений, записанных в полосе приема на магнитные носители до детектирования, проводится на ЭВМ центра сбора информации. В результате совместной обработки получают интерферограммы с крайне узкими лепестками. Такие интерференционные системы или сети РСДБ с антеннами, разнесенными на расстояния порядка диаметра Земли, позволили получить разрешение на несколько порядков выше, чем в оптике (тысячные доли угловой секунды). Вынос антенных элементов подобных РСДБ-систем в космическое пространство еще на порядок и более увеличивает их разрешающую способность и дает возможность обнаруживать интереснейшие явления в ядрах квазаров и радиогалактик, изучать происходящие там мощные нестационарные процессы. (см. гл. 2).

К системам с заполненной апертурой (рефлекторного типа) принадлежит и оригинальная конструкция радиотелескопа с антенной переменного профиля, рефлектор которой составлен из большого числа элементов, предложенная и реализованная в Советском Союзе в уникальном инструменте РАТАН-600, подробно рассмотренным ниже, в этой главе [8].

На основе многоэлементных систем в радиоастрономии появились радиотелескопы с синтезированной апертурой [3–5]. В этих инструментах, принадлежащих к классу систем с незаполненной апертурой, изображение объекта наблюдения получается в результате обработки данных, полученных с интерферометров, объединяющих две антенны или более, дающие информацию об амплитуде и фазе пространственной гармоники фурье-разложения распределения яркости исследуемого объекта. Обладая высокой чувствительностью, современные системы апертурного синтеза ведущих обсерваторий мира по разрешающей силе сопоставимы с оптическими телескопами или превзошли их (см., например, [3]). Объединение РСДБ-сетей в системы апертурного синтеза [4] дает возможность создать синтезированный радиотелескоп с апертурой порядка диаметра Земли и образовать так называемый глобальный радиотелескоп (в зарубежной литературе принят термин VLBA — сверхдлинная антенная решетка). В будущем следует ожидать такие решетки, элементы которых могут размещаться и в космосе.

Как уже отмечалось, наземные радиотелескопы работают от дециметрового до миллиметрового диапазонов волн. Очевидно, что радиотелескопы различных диапазонов отличаются как по конструкции антенных систем, так и по типу приемных устройств. Антенны для приема волн длиной порядка метра и больше обычно содержат решетки диполей, спиралей и других простейших излучателей. Часто такие системы устанавливаются как облучатели в цилиндрическом зеркале или располагаются над плоским экраном².

Антенны радиотелескопов, работающих на длинах волн короче метра, часто имеют главное зеркало параболической, сферической, конической или близкой к ним формы, а также вторичное зеркало меньшего размера с гиперболической, эллиптической, цилиндрической или специальной поверхностью. Совокупность зеркал преобразует падающую от источника плоскую волну в сферическую, в центре которой устанавливается элементарная приемная антенна, называемая первичным облучателем (диполь или рупор), соединенная линией передачи с приемным устройством.

Для исследования характера поляризации излучения от источника первичный облучатель должен быть приспособлен для приема и выделения различных поляризаций, описываемых параметрами Стокса [4].

Приемное устройство радиотелескопа — радиометр — служит для измерения мощности шумового излучения, принимаемого от источника. Оно обычно содержит малошумящий усилитель с широкой полосой пропускания частот Δf и стабильным коэффициентом усиления. Для отделения шумового сигнала источника от изменения уровня сопутствующих шумов $T_{\text{ш}}$ самого радиотелескопа и внешней среды применяются специальные методы приема (корреляционный, модуляционный, с пилот-сигналом и др.; см. [4]). На выходе радиометра имеется детектор с узкополосным фильтром с полосой пропускания ΔF . Радиометр снабжается калибратором мощности сигнала, а иногда противопомеховыми устройствами. Для

² По укоренившейся в теории антенн традиции, основанной на известной теореме взаимности, элементы антенн независимо от назначения (передача или прием) называют облучателями.

улучшения пороговой чувствительности ΔT_a полосу частот Δf выгодно увеличивать, так как мощность шумового сигнала растет пропорционально Δf , в то время как флуктуации шума (стандартное отклонение) увеличиваются пропорционально $\sqrt{\Delta f}$. Поэтому относительные флуктуации падают как $1/\sqrt{\Delta f}$. С другой стороны, при наблюдениях спектральных радиолиний очевидно, что полоса Δf должна быть порядка ширины линии. Полосу фильтра низких частот ΔF после детектора, наоборот, выгодно уменьшать (увеличивать постоянную времени интегрирования), так как флуктуации низкочастотных шумов на выходе радиометра будут пропорциональны $\sqrt{\Delta F}$. Таким образом, пороговый сигнал радиометра будет

$$\Delta T_a \approx T_{ш} \sqrt{\Delta F / \Delta f}. \quad (1.3)$$

Радиометр в случае необходимости снабжают спектр-анализатором, а также разделителем каналов поляризации по параметрам Стокса. На выходе радиометра включены регистраторы и ЭВМ, осуществляющие корреляционный, спектральный и поляризационный анализ излучения, принимаемого от космических источников, и представляющие результаты наблюдений в числовой или графической форме. Часто эта же ЭВМ используется для управления наведением и слежением антенны радиотелескопа за источником.

Для исследования физических характеристик большого числа слабых источников радиотелескоп должен обладать большой разрешающей способностью, высокой чувствительностью по спектральной плотности потока радиоизлучения ΔS и иметь возможность измерять поляризационные параметры излучения.

Чувствительность радиотелескопа по плотности потока

$$\Delta S = \frac{2k\Delta T_a}{A_{эф}} = \frac{kT_{ш}}{A_{эф}} \sqrt{\frac{\Delta F}{\Delta f}} \quad (1.4)$$

существенно зависит от диапазона волн, так как от длины волны зависит максимально реализуемая эффективная площадь антенны $A_{эф}$, полоса частот Δf и минимальная шумовая температура $T_{ш}$.

В лучших радиотелескопах (дециметровых и сантиметровых волн) предельно обнаружимые плотности потока ΔS достигают долей мЯн. Реальная чувствительность по плотности потока может оказаться ниже определяемой шумовой температурой самого радиотелескопа $T_{ш}$, так как шумы внешнего происхождения могут оказаться значительно большими, чем $T_{ш}$. Особенно неприятны появляющиеся на выходе антенны нестационарные во времени шумы, которые могут маскировать искомый сигнал и возникают, например, при движении тропосферных или ионосферных неоднородностей, переносимых ветром относительно радиотелескопа. Хаотически меняющиеся шумы появляются также при перемещении диаграммы направленности радиотелескопа в пространстве из-за мощных локальных источников радиоизлучения на поверхности Земли и от теплового излучения местных предметов, попадающих в боковые лепестки диаграммы направленности, определяющие уровень рассеяния антенны радиотелескопа. Нестационарность числа слабых космических источников, излучения которых одновременно принимаются антенной при движении ее луча

по небу, может также ухудшить чувствительность радиотелескопа при наблюдении дискретных источников.

В намеченных выше направлениях развития радиоастрономии заметное участие приняли советские радиоастрономы, развернувшие свои исследования начиная с 1946 г. [9]. Успехи советской радиоастрономии, разумеется, тесно связаны с развитием советского радиотелескопостроения. Ведущие научные коллективы радиоастрономов нашей страны к началу 80-х годов создали ряд крупных радиотелескопов, параметры которых сравнимы или превосходят лучшие мировые образцы. Отечественные радиотелескопы используются во всех радиоастрономических диапазонах: от декаметровых до субмиллиметровых волн.

В Советском Союзе построены:

- 1) зеркальные радиотелескопы как наземные, так и для работы в космическом пространстве;
- 2) радиотелескопы с расчлененной зеркальной поверхностью;
- 3) многоэлементные радиотелескопы с незаполненной апертурой;
- 4) радиотелескопы с фазированными решетками.

В конце 40-х и начале 50-х годов радиоастрономы ФИАН, НИРФИ, ИЗМИРАН, БАО и КраО использовали радиолокационные антенны, которые они своими силами модернизировали и усовершенствовали. В последующие годы в этих научных организациях, а также в ГАО, САО, в ИРЭ АН УССР и СибИЗМИРе началось строительство оригинальных радиотелескопов всех диапазонов в соответствии с обширными планами наблюдений [9].

В начальный период отечественной радиоастрономии сформировались главные направления развития советских радиотелескопов и коллективы их создателей. Этими коллективами был накоплен конструкторский и технологический опыт.

Дальние перспективы развития радиоастрономии С.Э. Хайкин видел в освоении сантиметрового и миллиметрового диапазонов как наиболее информативных по разрешению и чувствительности. По его инициативе А.Е. Саломонович и П.Д. Калачев с коллективом сподвижников в ФИАНе создают в 1955 г. первый в СССР радиотелескоп миллиметрового диапазона с зеркалом диаметром 2 м, а в 1959 г. — крупнейший в то время радиотелескоп сантиметровых и миллиметровых волн [10] с очень большим и очень точным зеркалом диаметром 22 м — РТ-22 ФИАН.

Под руководством С.Э. Хайкина и Н.Л. Кайдановского разрабатывается оригинальная идея построения большого радиотелескопа с переменным профилем отражателя [8]. В ГАО АН СССР в 1956 г. был построен Большой пулковский радиотелескоп (БПР), прообраз будущего РАТАН-600, который был создан в 1977 г. под руководством Ю.Н. Парийского, Н.Л. Кайдановского, Д.В. Королькова и А.З. Амстиславского [9].

В НИРФИ В.С. Троицкий с группой сотрудников в 1946–1978 гг. создают сравнительно небольшие радиотелескопы для диапазона сантиметровых и дециметровых волн, с помощью которых с 1961 г. успешно развивается оригинальный метод калибровки инструментов для прецизионного измерения принимаемого излучения с использованием "искусственной Луны" — черного поглощающего диска больших размеров [5, 9].

Большую перспективу развития исследований в метровом диапазоне волн обосновывает в своих работах В.В. Виткевич [7]. По его инициати-

ве начинается разработка крестообразного радиотелескопа ФИАН. Он и Б.М. Чихачев активно пропагандируют многоэлементные интерференционные системы как главное направление увеличения разрешения инструментов метрового и дециметрового диапазонов волн. В.В. Виткевич, являясь активным сторонником интерференционных методов в радиоастрономии, предлагает использовать в интерферометре с большой базой радиорелейные каналы для связи между его антеннами. В начале 60-х годов под его руководством и при участии П.Д. Калачева и Ю.П. Ильясова создается уникальная система диапазонного крестообразного радиотелескопа – ДКР-1000 ФИАН [9].

В.В. Виткевич совместно с Ю.П. Ильясовым обосновывает создание крупной антенны с заполненной апертурой (Большая сканируемая антенна – БСА ФИАН) в метровом диапазоне для исследования пульсаров и мерцающих источников. При жизни В.В. Виткевича началось сооружение этого большого радиотелескопа, достроенного в 1973 г., после его кончины [9].

Коллектив радиоастрономов ИРЭ АН СССР под научным руководством С.Я. Брауде активно развивает радиоастрономические исследования в дециметровом диапазоне. Группа сотрудников этого института под руководством А.В. Меня и Л.Г. Содина успешно разрабатывает принципы построения дециметровых радиотелескопов с незаполненной апертурой с широким использованием методов электрического фазирования в антенных трактах. Создается несколько небольших радиотелескопов, послуживших макетами для уникального отечественного радиотелескопа дециметрового диапазона волн (Украинского Т-образного радиотелескопа УТР-2), который проектировался и сооружался с 1964 по 1970 г. [9].

Из достаточно крупных инструментов начального периода необходимо отметить также неподвижный параболюид диаметром 30 м в земляной выемке, построенный в 1955 г. в Крымской научной станции ФИАН под руководством В.В. Виткевича и модернизированный в 1957 г. В.А. Удалцовым для работы на сантиметровых волнах, а также два полноповоротных радиотелескопа в виде секции, вырезанной из параболюида, построенных там же [9].

В НИРФИ велись наблюдения на двух крупных по тем временам радиотелескопах с параболическими рефлекторами диаметром 15 м, созданных к 1962 г. Там же в 1967 г. построен под руководством А.Г. Кислякова и И.В. Мосолова пассажный радиотелескоп РТ-25×2 по системе Крауса [3, 5] с плоским поворотным зеркалом – переотражателем для работы на длинах волн до 1,35 мм, что обеспечивало рекордное разрешение в 13" [9].

В Пулково, в ГАО АН СССР, успешно работал БПР в сантиметровом диапазоне волн на минимальной длине λ волны 3 см, а после реконструкции в 1966 г. – вплоть до $\lambda = 8$ мм с разрешением 15" [9].

В БАО АН АрмССР под руководством В.А. Самаяна в 60-е годы создано несколько больших антенн в виде параболического цилиндра для работы в многоэлементных интерференционных системах [9].

В 1963–1965 гг. в КраО АН СССР И.Г. Моисеев с коллективом сотрудников при участии П.Д. Калачева сооружает радиотелескоп миллиметрового диапазона волн, аналогичный по конструкции РТ-22 ФИАН. Его параметры удалось улучшить с учетом опыта строительства первого такого инструмента в ФИАНе [9].

В 1965 г. в СибИЗМИРе СО АН СССР начались работы над проектом многоэлементного крестообразного радиотелескопа для исследования радиоизлучения Солнца на сантиметровых волнах с высоким разрешением. В 1967 г. научным руководителем проекта создания инструмента решением СО АН СССР был назначен А.А. Пистолькорс. Он возглавил Совет ведущих радиоастрономов страны по этому инструменту. В последующие годы в СибИЗМИРе коллектив под руководством Г.Я. Смолькова выполнил большой объем работ по сооружению этого уникального Сибирского солнечного радиотелескопа (ССРТ) [9].

Освоение диапазона коротких миллиметровых волн началось в МВТУ с создания А.М. Кугушевым, Б.А. Розановым, А.А. Паршиковым и др. двух прецизионных телескопов диаметром более 7 м [11].

В конце 70-х годов под руководством П.М. Геруни было начато сооружение единственного в мире радиотелескопа со сферическим рефлектором для миллиметровых волн диаметром 54 м — РТ-2,6/32/54 во ВНИИРИ близ г. Еревана.

В 70-е годы для развития радиоастрономии в сантиметровом и миллиметровом диапазонах был построен уникальный радиотелескоп РАТАН-600 САО АН СССР, сооружены полноповоротные антенны диаметром 70 м в Евпатории и Уссурийске, диаметром 64 м — в пос. Медвежьи озера под Москвой. Эти инструменты с прецизионными рефлекторами обладают высокими коэффициентами использования поверхности (КИП) и хорошей точностью наведения и сопровождения [12].

Указанные успехи были достигнуты благодаря внедрению разработанного советскими специалистами принципа согласованных деформаций параболических антенн (П.Д. Калачев, И.Н. Князев, В.С. Поляк, А.Г. Соколов и др.). Высокие параметры зеркальных радиотелескопов были достигнуты в результате создания оптимальных систем облучения (Л.Д. Бахрах, А.Ф. Богомолов, М.И. Григорьева, В.А. Гришмановский, Н.А. Есепкина, А.Н. Козлов, Б.А. Попереченко, В.Б. Тарасов и др.). Большой вклад в разработку методов юстировки отражающих поверхностей радиотелескопов, технологию их изготовления и геодезическую выверку и привязку систем наведения внесли Ю.К. Зверев, П.Д. Калачев, А.И. Копылов, А.Д. Кузьмин, Ф.Л. Мещанский, А.А. Паршиков, Б.А. Розанов, А.Е. Саломонович, А.А. Стоцкий, О.Н. Шиврис и др.

Развитию многоэлементных радиотелескопов и техники их фазирования способствовали работы Ю.М. Брука, Ю.П. Ильясова, Б.Б. Криссинеля, А.В. Меня, Г.Я. Смолькова, Л.Г. Содина, Т.А. Трескова и др.

Советскими специалистами были созданы радиотелескопы для работы в космическом пространстве. На борту станции "Салют-6" длительное время (1977–1981 гг.) эксплуатировался субмиллиметровый телескоп БСТ-1М ФИАН, созданный под научным руководством А.Е. Саломоновича [9], с параболическим зеркалом диаметром 1,5 м для работы на длинах волн до 0,1 мм. Приемник телескопа охлаждался до 4,5 К.

В 1979 г. был создан под научным руководством Н.С. Кардашева и развернут на орбите космический радиотелескоп КРТ-10 с раскрывающимся параболическим зеркалом диаметром 10 м. Работа с этими телескопами на борту станции "Салют-6" позволила отработать методы радиоастрономических наблюдений в космическом пространстве [9].

Ниже в этой главе подробно будут описаны конструкции и параметры основных радиотелескопов Советского Союза. Последовательно рассмотрены инструменты с зеркальными антеннами, с расчлененными отражающими поверхностями, многоэлементные радиотелескопы с незаполненной апертурой различных модификаций, радиотелескопы с фазированными решетками.

В литературе, приведенной в конце книги, читатель может получить более детальные сведения об инструментах и их создателях. Основное внимание, как подчеркивалось выше, уделяется антенным системам, хотя кратко упоминается типовая приемная аппаратура и системы автоматизации.

1.1. Зеркальные радиотелескопы

Радиотелескопы с зеркальными антеннами широко используются в радиоастрономии. Они относятся к классу радиотелескопов с заполненной апертурой [3–5]. Эти инструменты, как правило, работают в широком диапазоне частот, могут (при наличии поворотного устройства) длительное время сопровождать объект наблюдения, у них может быть большая эффективная площадь и достаточно высокое разрешение, особенно на коротких сантиметровых, миллиметровых и субмиллиметровых волнах. Такие антенны могут быть также элементами радиотелескопов апертурного синтеза и интерферометров (инструментов с незаполненной апертурой). Проблема конструирования и создания совершенных зеркальных радиотелескопов была и остается одной из ключевых в наблюдательной радиоастрономии.

В большинстве радиотелескопов с заполненной апертурой в качестве основного рефлектора антенной системы используется парабола вращения. Стремление повысить чувствительность и разрешающую силу инструментов за счет увеличения их диаметра и уменьшения рабочей волны встречает большие трудности. Они вызваны тем, что необходимо обеспечить высокие фокусирующие свойства рефлектора для максимально коротких волн независимо от угла наклона оси рефлектора, т.е. обеспечить высокую точность и жесткость отражающей поверхности. Радиотелескоп РТ-22, разработанный и созданный в ФИАНе, оказался одним из первых в мире инструментов, в котором эти проблемы были оригинально и успешно решены [10]. Его жесткий каркас с радиально-симметричной схемой ферм опирался на конструкцию подвески в четырех базовых точках, расположенных на секторах угломестного поворотного устройства. Гравитационные деформации такой конструкции при поворотах ее вокруг горизонтальной оси оказались относительно небольшими. Дальнейшее развитие эти идеи получили при создании радиотелескопа РТ-22 КрАО, а позднее двух радиотелескопов миллиметровых волн МВТУ диаметром 7,75 м [11].

Масса конструкций поворотных зеркальных радиотелескопов увеличивается в зависимости от диаметра D их рефлектора как $D^{2,3 \div 2,8}$.

При увеличении диаметра гравитационные деформации зеркала становятся преобладающими и все больше определяют предельные возможности инструментов: минимальную рабочую волну и максимальную эффективную площадь (максимальный коэффициент направленного действия — КНД).

Независимо в СССР и за рубежом был предложен и разработан новый, ставший ныне основным принцип конструирования силового каркаса рефлектора [13–15]. Его конструктивная схема строится так, чтобы при изменении формы рефлектора от гравитационных нагрузок из-за наклонов обеспечить ее минимальные отклонения от аппроксимирующих параболоидов (или квазипараболоидов) вращения, параметры которых могут сложным образом зависеть от угла наклона. В таких инструментах с "согласованными" деформациями последние достаточно просто компенсируются изменением положения облучателя антенны по мере ее наклона. Отклонения в направлении оси приема компенсируются введением координатных поправок в приводную систему. Частный случай таких конструкций был предложен в [14], где деформации рефлектора, полностью сохраняющие его параболическую форму (при изменяющихся параметрах), называются гомологическими. Эти прогрессивные принципы конструирования были успешно применены в уникальных советских радиотелескопах РТ-70 и РТ-64 [15–17].

Принципиально важные новые возможности, дающие значительное увеличение жесткости рефлектора, были получены в новых схемах с многоопорной подвеской, предложенных и подробно рассмотренных в [18] в сочетании с радиально-симметричной схемой каркаса.

Позже за рубежом появилась публикация с описанием разновидности такой схемы в виде октаэдра [14].

При создании отечественных зеркальных радиотелескопов были разработаны и успешно применены передовые методы изготовления и выверки их поверхности. Впервые в мировой практике в радиотелескопе РТ-22 ФИАН было предложено на жестком, но относительно грубом каркасе устанавливать на регулируемые шпильки предварительно отформованные листы (панели) отражающей поверхности. Юстировка поверхности рефлекторов телескопов РТ-22 (ФИАН и КрАО) велась по технологическому шаблону, параболическая форма которого была выверена механо-геодезическими методами со среднеквадратичной погрешностью 0,1 мм [19, 20]. В последующие годы практически во всех крупных радиотелескопах мира панели и листы отражающей поверхности стали монтировать на регулируемых опорах, а не крепить их жестко к каркасу. В самых последних разработках прецизионных рефлекторов на переменные по высоте опоры устанавливают автоматизированные приводы, соединенные с ЭВМ для возможности оперативного измерения и изменения формы поверхности [21].

Методы юстировки поверхности с применением механических шаблонов получили дальнейшее развитие при создании радиотелескопов МВТУ [11, 22]. Применение для них оптико-геодезических методов для выверки шаблона с использованием лазерного луча обеспечило среднеквадратичную ошибку кромки шаблона 0,017 мм. Окончательная доводка поверхности этих инструментов с помощью фрезы, установленной на таком шаблоне, обеспечила суммарную среднеквадратичную погрешность рефлектора для второй из антенн МВТУ 0,063 мм [11]. Оптико-геодезические методы выверки поверхности широко использовались и при юстировке поверхностей радиотелескопов РТ-70 и РТ-64 [23, 24].

Строго говоря, поверхности рефлекторов этих двух инструментов

не являются параболами вращения: они квазипараболичны. Советскими учеными была предложена и разработана оригинальная двухзеркальная схема рефлекторной антенны [25–27]. В этой схеме форму малого вторичного зеркала подбирают так, чтобы обеспечить в раскрые антенны амплитудное распределение поля, близкое к равномерному, при котором достигается максимальный КИП, а компенсацию возникающих при этом дополнительных фазовых ошибок проводят за счет небольших отклонений формы главного зеркала от параболоида. Такая схема двухзеркальной антенны привела к общему высокому КИП, что особенно существенно на коротких волнах. С учетом запроектированных согласованных гравитационных деформаций стало возможным построить оптимальную схему облучения и найти закон перемещения вторичного зеркала при наклонах рефлектора [15, 28]. У радиотелескопов РТ-64 и РТ-70 отклонения квазипараболической формы от точной параболы оказались небольшими, поэтому на длинах волн более 40 см эти радиотелескопы могут эффективно облучаться из первичного фокуса и работать как обычные параболоиды.

К облучающим системам современных инструментов предъявляются высокие требования. Они должны обеспечивать высокий КИП, малые шумовые температуры антенной системы и хорошие поляризационные характеристики. Как уже отмечалось, для крупных радиотелескопов советскими специалистами были предложены и внедрены многозеркальные схемы. В частности, многозеркальные облучательные схемы были разработаны для радиотелескопов РТ-22 ФИАН и КраО, они обеспечивали одновременные наблюдения на нескольких волнах [29–31].

Управление современными радиотелескопами, наведение в заданную точку и слежение за объектом наблюдения в течение длительного времени являются сложной технической проблемой. Монтировка всех отечественных крупных радиотелескопов выполнена по азимутальной схеме. Поэтому очевидно, что при наблюдении астрономических объектов, положение которых наиболее естественно определяется в экваториальной или галактической системах координат, приходится пересчитывать текущие координаты источников в горизонтальную систему координат, в которой выполняются перемещения рефлектора радиотелескопа вокруг его осей. При этом погрешность пересчета и измерения, как правило, не должна превышать нескольких единиц угловых минут или даже угловых секунд. Успешное решение этой проблемы было найдено вначале путем использования аналоговых преобразователей координат [19], а затем в построении цифровых систем отсчета положения осей телескопа и использовании универсальных или специализированных ЭВМ в контуре управления радиотелескопом [32, 33].

Советские радиотелескопы с полноповоротными рефлекторами являются уникальными инструментами и по своим параметрам сравнимы с лучшими зарубежными радиотелескопами. В табл. 1.1 приведены параметры основных радиотелескопов мира с полноповоротными параболическими антеннами [34–37]. Они расположены в порядке их ввода в эксплуатацию. В таблице приведены значения среднеквадратичных отклонений поверхности от заданной формы σ . Как известно, этот параметр характеризует качество антенны и определяет ее минимальную рабочую волну. Для сравнения дано также отношение диаметра D зеркала к среднеквадратичной ошиб-

Таблица 1.1

№ п/п	Страна, организация	Год пуска	D , м	σ , мм	D/σ , 10^4	G , дБ	$\lambda_{\min}$, мм	Примечание
1	Англия, Манчестер (Джодрелл-Бэнк)	1957	76	10	0,76	60	126	"Ловелл" Модернизирован в 1970 г. РТ-22
1 м		1970	76	5	1,5	66	60	
2	СССР, ФИАН (Пушино)	1959	22	0,3	7,3	79,7	3,8	Модернизирован в 1974 г.
3	Австралия, КСИРО (Паркс)	1961	64	3	2,1	68,9	33	
3 м		1974	64	2	3,2	72,5	25	
4	США, "Аэроспейс"	1963	4,6	0,08	5,8	77,6	1	
5	Канада, Радиотехническая сбор- ватория	1965	46	1,15	4	74,4	14,5	РТ-22
6	США, НРАО (Грин-Бэнк)	1965	42	1,02	4,1	74,7	12,8	
7	СССР, КраО (Симеиз)	1966	22	0,15	14,6	85,6	1,9	
8	США, Калифорнийский техноло- гический ин-т (Оуэнс Вэлли)	1966	39,6	0,9	4,4	75,2	11,3	
9	США, НАСА (Голдстоун)	1966	64	4	1,6	66,4	50	Радиопрозрачный колпак
10	США, Массачусетский технологический ин-т (Хайстек)	1967	37	0,7	5,3	76,6	8,8	
11	США, НРАО (Кит-Пик)	1967	11	0,15	7,3	79,7	1,9	Астрокул Модернизирован в 1983 г.
11 м		1983	12	0,67	17,1	87	0,9	
12	Бразилия, ун-т Маккензи (Итапетинг)	1971	13,7	0,34	4	74,4	4,3	Радиопрозрачный колпак
13	СССР, МВТУ (Москва)	1972	7,75	0,15	5,2	76,6	1,9	
14	ФРГ, ин-т М. Планка (Эффельсберг)	1972	100	0,9	11,1	83,3	11,3	РТИ-7,5/250 Западная антенна
15	Финляндия, Хельсинкский ун-т (Хельсинки)	1973	13,7	0,13	10,5	82,8	1,6	

16	Швеция, Чалмерский ун-т (Онсала)	1976	20	0,15	13,8	84,9	1,9	Радиопрозрачный колпак
17	СССР, МВТУ (Москва)	1978	7,75	0,063	12,3	84,2	0,79	РТИ-7, 5/250 Восточная антенна
18	СССР, ЦДКС (Евпатория)	1978	70	0,77	9,1	81,6	9,7	$\sigma = 0,77$
19	США, Калифорнийский технологический ин-т (Оуэнс Вэлли)	1979	10,4	0,035	30	91,8	0,44	в 1982 г.
20	СССР, ОКБ МЭИ (Медвежий озеро)	1980	64	1,5	4,3	75,0	18,8	
21	Япония, Токийский ун-т (Нобеяма)	1982	45	0,2	22,5	89,4	2,5	
22	Япония, Токийский ун-т (Нобеяма)	1983	10	0,07	14	83,3	0,88	
23	ФРГ — Франция, ин-т М. Планка — ИРАМ (Пико Велетта, Испания)	1983	30	0,09	33,3	92,8	1,1	Термоизолирующее укрытие
24	ФРГ — Франция, ИРАМ — Гренобль — плато де Бюр	1985	15	0,1	15	85,9	0,8	
25	Европейское космическое агентство (ESO) (Ла Силла, Чили)	1986	15	0,1	15	85,9	0,8	
26	Англия — Голландия (Мауна Кеа, Гавайи)	1986	15	0,035	42,8	95,0	0,7	Укрытие
27	США, Калифорнийский технологический ин-т (Мауна Кеа, Гавайи)	1987	10,4	0,015	69,3	99,2	0,05	Укрытие

Примечания. КСИРО — Федеральная организация научных и промышленных исследований; ИРАО — Национальная радиоастрономическая обсерватория; НАСА — Национальное агентство космических исследований; ИРАМ — Институт радиоастрономии миллиметровых волн.

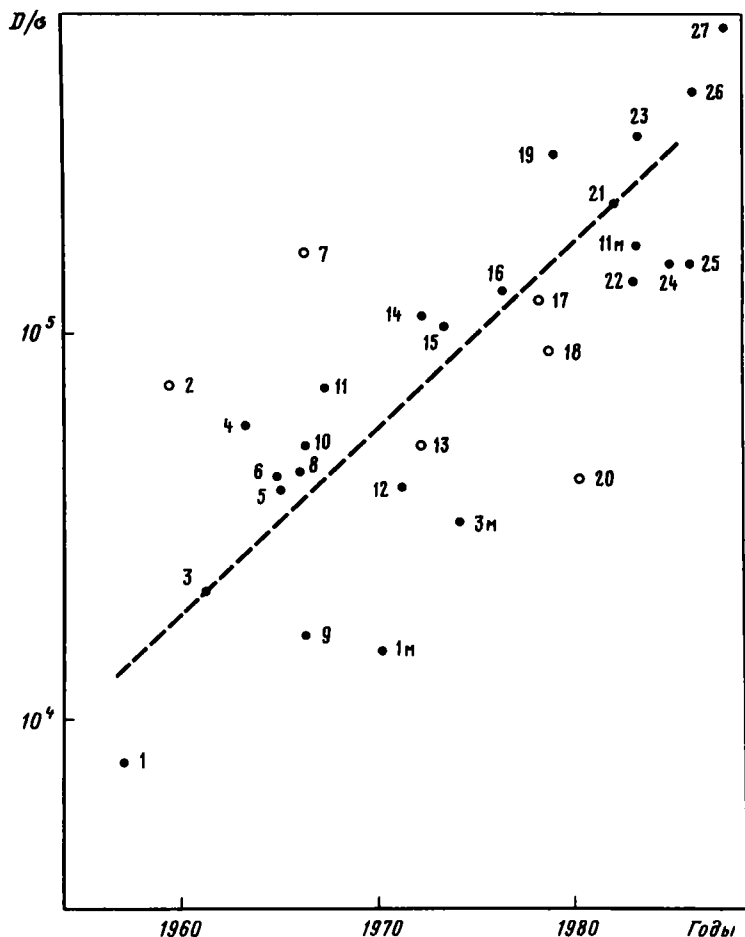


Рис. 1.1. Отношение D/σ для различных радиотелескопов мира с параболическими рефлекторами (номера инструментов по табл. 1.1)

Светлые кружки – советские радиотелескопы; темные – зарубежные. Штриховая линия – средний темп роста D/σ

ке σ . В столбце 7 приведены рассчитанные значения максимального КНД антенны на минимальной рабочей волне $\lambda_{\min}$. В последнем столбце указан тип укрытия зеркала (радиопрозрачный купол, колпак), марка инструмента и другие особенности.

В предположении, что оптимальное облучение рефлектора можно обеспечить независимо от длины волны и что геометрические факторы, определяющие затемнение и рассеяние на несущих облучательную систему конструкциях, не зависят от частоты [27], КНД (в дБ) определяется как

$$G = 10 \lg K (\pi D / \lambda)^2 \exp [- (4\pi\sigma / \lambda)^2], \quad (1.5)$$

где K – суммарный КИП.

Легко получить из (1.5), что КНД достигает максимального значения

$$G = 10 \lg 0,37 K (D/4\sigma)^2 \quad (1.6)$$

на длине волны

$$\lambda_{\min} = 4\pi\sigma. \quad (1.7)$$

Заметим, что часто за минимальную длину волны принимают $\lambda = 20\sigma$, когда из-за погрешностей рефлектора эффективная площадь $A_{\text{эф}} = 0,67 A_{\text{max}}$. Значения K в различных работах [11, 21, 35, 36] принимаются от 0,52 до 0,97. Для облегчения сравнения реальных возможностей инструментов значения G в табл. 1.1 найдены при $K = 0,75$. Как показал опыт создания радиотелескопов РТ-70 (СССР), получить такое высокое значение K реально [38].

Динамика развития и совершенствования радиотелескопов мира иллюстрируется на рис. 1.1 [34]. За 20 лет значение D/σ в среднем увеличилось на порядок.

Для основных радиотелескопов с параболическими рефлекторами в порядке увеличения их диаметра были рассчитаны зависимости $G(\lambda)$. Результаты приведены на рис. 1.2. В работе [14] получена зависимость среднеквадратичной ошибки поверхности, вызываемой гравитационными деформациями, от диаметра рефлектора радиотелескопа обычной неомологической конструкции: $\sigma = 0,33 (D/100)^2$. Если взята длина волны $\lambda_{\min} = 4\pi\sigma$, на которой достигается максимальное значение КНД — G_{τ} , то $\lambda_{\min} = 4,16 (D/100)^2$. С учетом этого и (1.5) получена зависимость $G_{\tau}(\lambda_{\min})$:

$$G_{\tau} = 10 \lg 0,75 \left(\frac{\pi D}{\lambda_{\min}} \right)^2 \exp \left[- \left(\frac{4\pi\sigma}{\lambda} \right)^2 \right] = 10 \lg \frac{6,58 \cdot 10^7}{\lambda_{\min}}. \quad (1.8)$$

При этом принято, как и прежде, $K = 0,75$.

На рис. 1.2 проведена прямая $G_{\tau}(\lambda)$. Отчетливо видно, что инструменты с согласованными деформациями превосходят этот гравитационный предел. Из рис. 1.1 и 1.2 видно, что параметры советских радиотелескопов с параболическими рефлекторами находятся на современном уровне. Заложенные в них конструктивные решения и осуществленные при строительстве технологические методы обеспечивают им ведущее место в мире. Особенно следует выделить радиотелескоп РТ-22 (ФИАН и КрАО). Этот инструмент, разработанный в середине 50-х годов и введенный в эксплуатацию в 1959 г. (РТ-22 ФИАН), не имел себе равных до начала 80-х годов (особенно РТ-22 КрАО) [20].

Остановимся подробнее на особенностях конструкций и параметрах основных зеркальных радиотелескопов, созданных в Советском Союзе.

Радиотелескоп РТ-22 (ФИАН, КрАО) [10, 19, 20, 30–32, 39–44]. Параболическое зеркало этого инструмента имеет диаметр 22 м, фокусное расстояние — 9,525 м, угол раскрытия зеркала — 120° . Фотография инструмента приведена на рис. 1.3.

Установка зеркала азимутально-угломестная. Применена схема облучения Кассегрена. Диаметр вторичного гиперболического зеркала 1 м (РТ-22 ФИАН) и 1,5 м (РТ-22 КрАО). Сектор поворота по углу места от 5° до 90° , по азимуту $\pm 180^\circ$. Среднеквадратичная погрешность поверх-

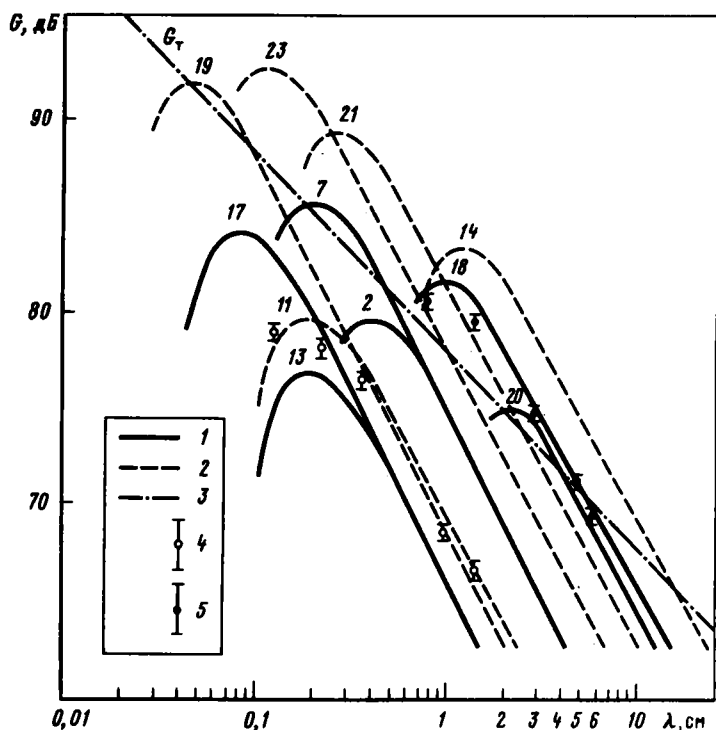


Рис. 1.2. Коэффициент направленного действия основных радиотелескопов мира (номера у кривых соответствуют табл. 1.1)

1 — советские радиотелескопы; 2 — зарубежные; 3 — предельное значение неомологических конструкций G_T ; 4 и 5 — экспериментальные значения КНД радиотелескопа РТ-11 и РТ-70 соответственно

ности рефлектора (технологическая и деформативная) 0,3 мм (РТ-22 ФИАН) и 0,15 мм (РТ-22 КрАО). На радиотелескопах РТ-22 проводились наблюдения на длинах волн вплоть до 4 мм (ФИАН) и 2 мм (КрАО).

Каркас зеркала радиально-симметричной конструкции (из стали) содержит центральную втулку диаметром 2 м, высотой 1,7 м, опорное внутреннее кольцо диаметром 11 м в виде клепаной 16-гранной балки высотой 2,3 м и наружное кольцо диаметром 21,7 м также в виде 16-гранной балки высотой 1,08 м. По 16 радиусам расположены радиальные плоские формы. Они связаны с лицевой стороны кольцевыми балками, к которым крепится обрешетка. Рефлектор жестко связан с двумя большими цевочными секторами и соединяющей их горизонтальной трубой диаметром около 2 м, являющейся осью вращения по углу места. В трубе размещена кабина с аппаратурой и пультом управления. Рефлектор закреплен на опорно-поворотном устройстве с помощью самоустанавливающихся роликовых подшипников. При креплении на четыре точки жесткость зеркала увеличилась примерно в 6 раз по сравнению с обычным двухточечным [18].

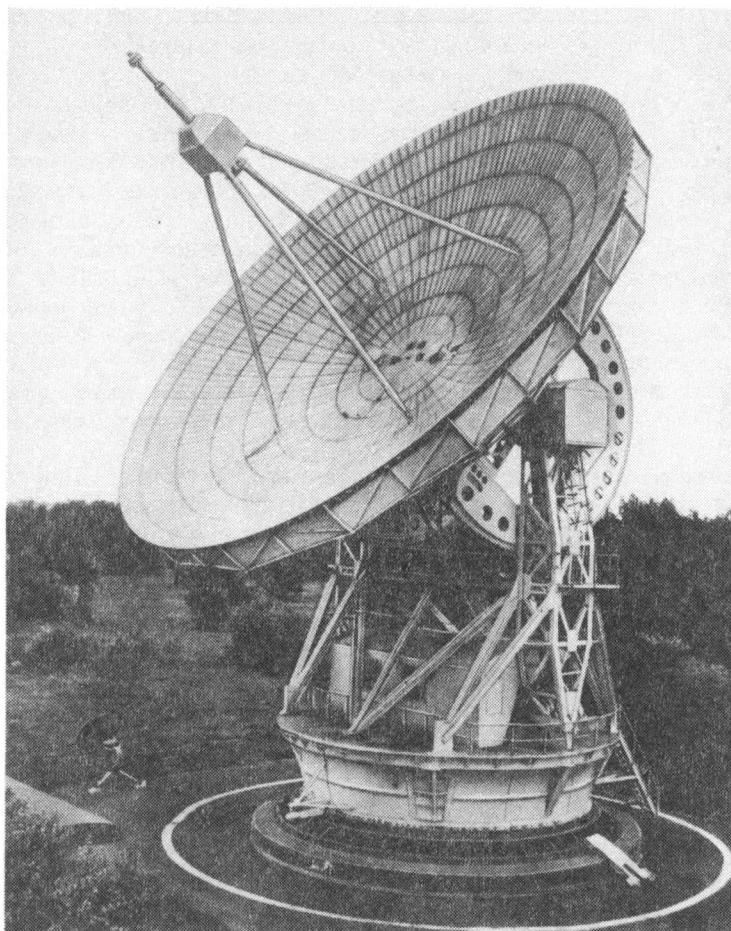


Рис. 1.3. Радиотелескоп РТ-22 ФИАН

Отражающая поверхность зеркала изготовлена из предварительно отштампованных алюминиевых листов (панелей) толщиной 6 мм. Они крепятся к каркасу с помощью регулируемых по высоте стоек (винтовых шпилек), расположенных с шагом 100 мм.

Как уже отмечалось, прочный, но грубый радиально-симметричный каркас большой жесткости обеспечил малые деформации зеркала при наклонах. А высокоточная поверхность получена за счет регулировки поверхности рефлектора по шаблону с помощью шпилек.

Масса рефлектора с цевочными секторами, горизонтальной осью и противовесами составляет 180 т, масса опорно-поворотного устройства — 233 т, закладных частей и опорного кольца — 50 т.

Азимутальный поворотный стол диаметром 12,4 м вращается вокруг вертикальной оси на шаровом подшипнике (круг катания диаметром

10,1 м). Шары (180 шт.) диаметром 150 мм, разделенные сепаратором, катаются между верхним и нижним кольцевыми шаровыми погонами, обработанными и отшлифованными на карусельном станке. Усилия от горизонтальных перемещений воспринимают ролики в вертикальном погоне.

На верхней площадке стола установлены две мощные ножевые опоры, на которые опирается горизонтальная ось инструмента. Поворот по углу места выполняется двумя параллельно работающими механизмами, связанными между собой на промежуточной ступени редукторов. Зацепление механизмов с секторами, так же как и в азимутальном приводе, цевочное.

Медленная скорость вращения РТ-22 по обеим осям порядка $0,25^\circ/\text{мин}$, быстрая по азимуту — $18^\circ/\text{мин}$, по углу места — $25,5^\circ/\text{мин}$. Первоначально на РТ-22 ФИАН была установлена система управления с использованием сельсинных схем измерения углов и аналогового преобразователя координат на основе синусно-косинусных вращающихся трансформаторов. Такая система обеспечивала точность наведения и сопровождения порядка $1'$ [19].

На сантиметровых волнах этой точности было достаточно. При наблюдениях на длине волны 8 мм для наведения РТ-22 использовался оптический гидирующий телескоп, установленный в трубе горизонтальной оси. На РТ-22 КрАО для управления использовалась специализированная ЭВМ, и точность наведения была выше. В результате модернизации на обоих радиотелескопах была установлена новая система управления с применением цифровых 18-разрядных датчиков положения осей и универсальной ЭВМ М-6000, включенной в контур управления [9, 32]. (В 1986 г. на РТ-22 ФИАН была установлена ЭВМ СМ-2 вместо М-6000). Дважды в секунду ЭВМ вырабатывает сигналы рассогласования по азимуту и углу места между расчетным и фактическим значениями в цифровой форме. Кроме того, вырабатывается сигнал, пропорциональный скорости изменения расчетных координат. Следящий привод по каждой оси вращения управляется от ЭВМ по скорости с коррекцией по углу при накоплении ошибки рассогласования более $5''$. Такая система позволила вести наблюдения без оптического сопровождения и значительно увеличила эффективность работы обоих телескопов. Погрешность наведения радиотелескопов с этой системой составляет около $10''$ [32].

Как уже отмечалось, схема облучения радиотелескопа РТ-22 кассегреновская. Первичные облучатели совмещены и установлены у вершины зеркала, что значительно уменьшило шумовую температуру антенны и дало возможность с помощью сравнительно коротких трактов подключить малошумящие квантовые парамагнитные усилители (мазеры) к облучателям [30, 31, 44].

Разработана и установлена в вершине параболоида двухзеркальная короткофокусная система (РТ-22 КрАО) на длине волны 3,3 см, диаграмма направленности которой $3,2^\circ \times 3,2^\circ$, что обеспечивает облучение края вторичного зеркала кассегреновской системы на уровне 18 дБ [31].

Рупорно-параболические облучатели разработаны на длины волн 13,5 и 8 мм. По паре таких облучателей установлено со смещением из вершины главного параболоида для приема в режиме диаграммной модуляции и снижения влияния шумов неоднородной атмосферы на этих волнах. Они обеспечивают облучение края гиперболического зеркала на уровне

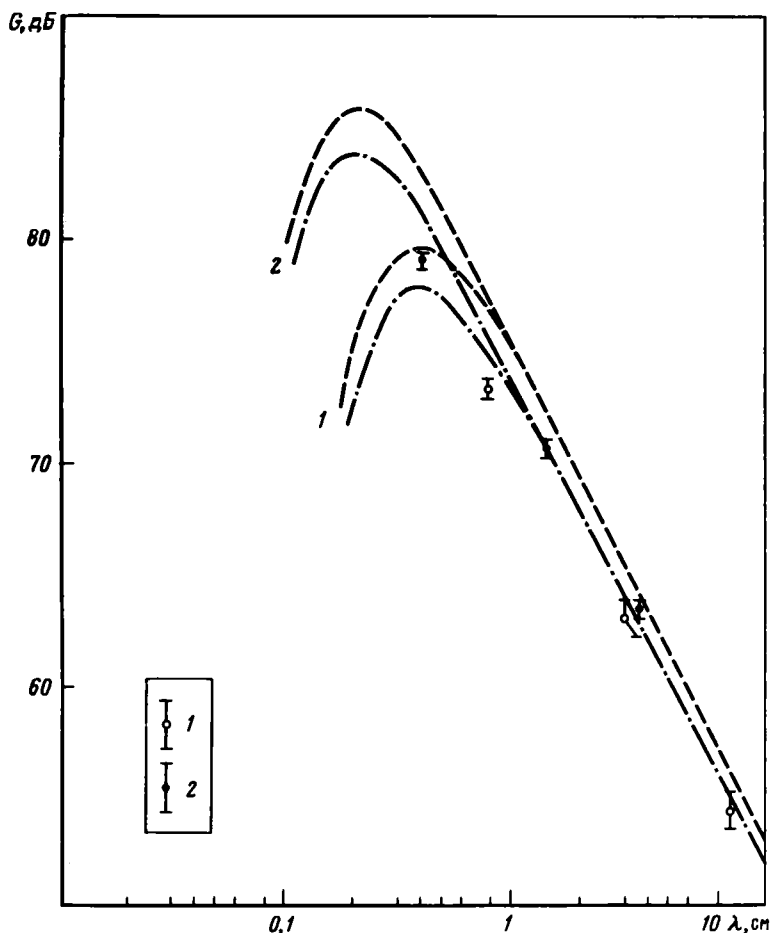


Рис. 1.4. Изменение КНД радиотелескопа РТ-22 в диапазоне длин волн

1 — ФИАН; 2 — КраО. Штрихпунктирные кривые — $K = 0,5$; штриховые — $K = 0,75$

20 дБ при коэффициенте рассеяния 0,06 [30]. Перевод работы радиотелескопов РТ-22 на двухзеркальную схему снизил их шумовую температуру до 10–15 К при общем КИП $K \approx 0,5$. В табл. 1.2 приведены опубликованные основные параметры первого (ФИАН) и второго (КраО) радиотелескопов (в скобках даны значения, полученные после пересчета по обычным соотношениям). На рис. 1.4 полученные значения КНД нанесены на расчетную зависимость $G(\lambda)$ при суммарном КИП, равном 0,5 и 0,75.

Оба эти инструмента миллиметрового диапазона были объединены в интерферометр со сверхдлинной базой (Пушино–Симеиз). Они обеспечили выполнение целого ряда уникальных научных экспериментов (подробнее см. гл. 2). На интерферометре в 1985 г. проводились наблюдения спускаемого зонда в атмосфере Венеры по проекту ВЕГА и кометы Галлея [45].

Таблица 1.2

λ, см	Ширина диаграммы направления, угл. мин	Aэф, м ²	K	G, дБ	Коэффициент рассеяния, β	Литература	Схема
ФИАН СССР							
9,6	19X19	190±30	0,5	54±0,7	0,32	[40]	Однозеркальная
3,36	—	150	(0,39)	(62,2)	—	[30]	Кассегреновская
3,2	6,4X6,4	185±30	0,49	63,5±0,7	(0,38)	[40]	Однозеркальная
1,35	2,5X2,5	130±13	0,33	69,5±0,4	0,57	[42]	Кассегреновская
0,8	2X2	108±20	(0,28)	(73,3)	0,43	[40]	Однозеркальная
0,8	—	80	(0,21)	(71,9)	—	[30]	Кассегреновская
0,4	1,6X1,6	(22)	(0,06)	(72,4)	0,7	[40]	Однозеркальная
КраО АН СССР							
3,34	5,9X6	186±10	0,49	63,2	(0,51)	[31]	Кассегреновская
1,35	2,35X2,4	164±10	0,43	70,5	(0,57)	[31]	„
1,35	2,5X2,6	163±10	(0,43)	(70,5)	(0,51)	[31]	„
0,4	0,9X0,77	100	(0,26)	(79)	(0,38)	[43]	„

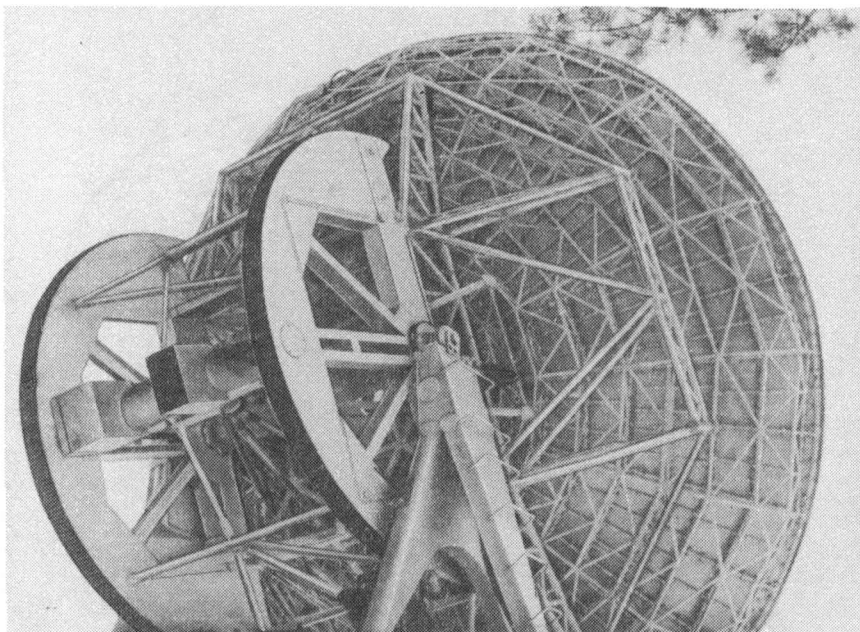


Рис. 1.5. Радиотелескоп РТ-7,5 МВТУ (восточная антенна)

Каждый из этих радиотелескопов эффективно использовался для решения различных радиоастрономических проблем: от наблюдений Солнца, Луны и планет и до исследования радиолиний в Галактике, квазаров и радиогалактик.

Радиотелескоп РТ-7,5 МВТУ [11, 22, 35, 45–48]. В МВТУ в 70-х годах создано два полноповоротных радиотелескопа с параболическими рефлекторами для работы на коротких миллиметровых волнах. Общий вид одного из радиотелескопов приведен на рис. 1.5. В дальнейшем предполагается использовать их в интерферометре с базой 250 м. В разработке конструкций этих радиотелескопов участвовали специалисты ФИАНа. В 1972 г. вступила в строй западная антенна интерферометра, в 1978 г. — восточная. Эти антенны несколько отличаются одна от другой конструкцией каркаса, опор облучателя и технологией изготовления.

Диаметр зеркала радиотелескопов 7,75 м, фокусное расстояние 3,25 м, угол раскрыва зеркала 123° . Монтировка инструментов азимутальная. Облучение из первичного фокуса. Сектор поворота по зенитному расстоянию от 0 до $87,5^\circ$, по азимуту $\pm 172,5^\circ$. Среднеквадратичные отклонения зеркальных поверхностей радиотелескопов (технологические и деформативные) составляют: для западной антенны — 0,15 мм, для восточной — 0,063 мм. При разработке силовой схемы каркаса зеркала (рис. 1.6) получили дальнейшее развитие идеи построения жесткой многоопорной конструкции. В этой схеме два угломестных сектора поворота (1), жестко связанных между собой, образуют четыре базовых точки, на которые опирается промежуточная конструкция (2), получающаяся от пересече-

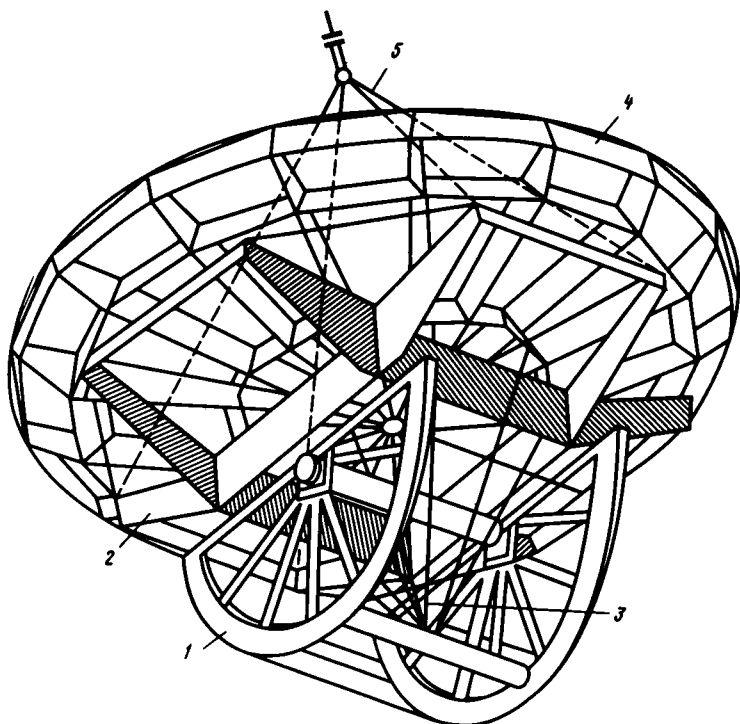


Рис. 1.6. Конструктивная схема поворотной части радиотелескопа РТ-7,5 МВТУ [11]

ния четырех плоских ферм (восемь внешних опор). Дополнительно по сравнению с РТ-2 введена девятистержневая пирамида (3), (восемь боковых и один центральный стержень). Собственно пространственная радиально-симметричная стержневая ферма каркаса зеркала (4) опирается на эту пирамиду и промежуточную конструкцию в 17 равножестких точках. В каркасе рефлектора имеется 16 радиальных плоских ферм и необходимое число хордовых элементов. Пирамида из опор облучателя (5) также входит в силовую схему. Как показали расчеты и экспериментальные исследования, весовые деформации на краю зеркала составляют 0,017 мм при симметричных нагрузках (зеркало направлено в зенит) и около 0,1 мм при кососимметричных нагрузках (зеркало направлено на горизонт).

Весовые деформации уменьшены примерно в 5 раз системой балансной компенсации, состоящей из контргрузов, закрепленных эксцентрично на оси противовеса (на горизонтальной трубе, соединяющей нижние точки зубчатых секторов механизма привода радиотелескопа по углу места), что приводит к компенсирующим перемещениям опор облучателя (5) (см. рис. 1.6). Еще один набор грузовых дисков системы компенсации расположен на кронштейнах, с задней стороны зеркала. Конструкции антенн цельносварные и изготовлены из тонкостенных стальных труб.

Отражающая поверхность рефлектора выполнена из алюминиевого листа толщиной 3 мм (западная) и 6 мм (восточная антенна). Предварительно отформованные листы размерами до 1,2×1,0 м крепятся к каркасу

зеркала с помощью регулируемых винтовых шпилек (около 5000 шт.) тем же методом, что и у РТ-22. Для западной антенны окончательная юстировка поверхности велась с помощью ручной шабровки, для восточной применялось фрезерное приспособление, установленное на шаблоне. Общая масса обшивки западной антенны около 500 кг. Сам шаблон в виде стальной плоской фермы массой около 1,5 т. Он обшит листом из нержавеющей стали толщиной 1,5 мм. Кромка шаблона выверена с высокой точностью с помощью коллимационно-оптического метода с применением лазера. Среднеквадратичное отклонение профиля шаблона от параболы составляет 17 мкм при погрешности измерений 2 мкм.

Проведенные тщательные исследования температурных деформаций зеркала показали, что оно может эффективно работать на миллиметровых волнах без радиопрозрачного укрытия или астроколпака, если принять соответствующие меры ("плавающее" крепление листов обшивки к каркасу, окраска конструкций в белый цвет, экранировка узлов конструкций от прямого солнечного нагрева и некоторые другие меры).

Для вращения по азимуту используются поворотные устройства. Они закреплены на системе домкратов, с помощью которых плоскость азимутального вращения устанавливается горизонтально. Поворот по углу места, так же как и в РТ-22, осуществляется через два сектора. Диаметр начальной окружности зубчатых секторов 4,1 м. Зацепление с редукторами привода зубчатое безлюфтовое. Общая масса вращающихся узлов радиотелескопа РТ-7,5 около 20 т.

Управление поворотами радиотелескопа по обеим координатам проводится с помощью синхронно-следающего привода с ЭВМ в его контуре. Расчетная скорость быстрого поворота: $5^\circ/\text{с}$ по азимуту, $8^\circ/\text{с}$ по углу места; медленного движения: не более $205''/\text{с}$ по азимуту, $325''/\text{с}$ по углу места. С интервалом 0,1 с в ЭВМ вычисляются координаты положения антенны радиотелескопа по обеим осям, сравниваются с показаниями цифровых 18-разрядных датчиков и по найденным ошибкам рассогласования выдаются команды на исполнительные двигатели следающего привода. Измеренная среднеквадратичная ошибка сопровождения объектов наблюдения составляет $7''$. Радиотелескоп может управляться в ручном или полуавтоматическом режиме. Предусмотрены различные режимы сканирования объектов наблюдения.

Облучатель радиотелескопа установлен в первичном фокусе на 4-опорной конструкции с малым затенением зеркала. Для диапазона длин волн 2—3,5 мм разработан ряд сменных высокочастотных головок супергетеродинных радиометров, имеющих шумовую температуру 1200—2500 К и обеспечивающих работу в режиме модуляции, как диаграммной, так и переключением антенна—эквивалент. В диапазоне длин волн 1—1,5 мм используется приемник на антимониде индия. Электрические характеристики радиотелескопов исследовались на волне 2,2 мм [11, 48]. Измеренные значения параметров и результаты проведенных здесь расчетов (в скобках) приведены в табл. 1.3.

Два созданных в МВТУ радиотелескопа с прецизионными рефлекторами для работы в диапазоне коротких миллиметровых волн эффективно работают по радиоастрономическим программам исследования радиоизлучения Солнца и спектральной радиоастрономии. Они оснащены современной

Таблица 1.3

Антенна	Литература	λ , мм	Ширина диаграммы направленности, угл. мин	$A_{эф}$, м ²	K	G, дБ
Измерения						
Западная	[11]	2,2	1,3	13	0,27	75
Восточная	[48]	2,2	1,2	21	0,42	78
Расчет						
Западная	[11]	8,0	—	(25,5)	0,54	(67)
		3,5	—	(20,3)	0,43	(73,2)
		2,2	—	(13,2)	0,28	(75,3)
		1,4	—	(4,2)	0,09	(74,3)
Восточная	[11]	8,0	—	(26,9)	0,57	(67,2)
		3,5	—	(25,9)	0,53	(74,2)
		2,2	—	(24,1)	0,51	(77,9)
		1,4	—	(20,3)	0,43	(81,1)

Примечание. При расчете параметров западной антенны использовались значения $\sigma = 0,15$ мм, $K = 0,6$; для восточной — $\sigma = 0,063$ мм, $K = 0,6$.

высокочувствительной аппаратурой и вычислительной техникой. Создание двухантенного интерферометра с базой 250 м с использованием этих антенн является хорошей перспективой развития радиоастрономических исследований в МВТУ в диапазоне коротких миллиметровых волн.

Радиотелескоп РТ-64 (ТНА-1500) [17, 24, 33, 49, 50]. Одним из крупнейших советских инструментов сантиметровых волн является радиотелескоп ТНА-1500, введенный в регулярную эксплуатацию в 1980 г. в пос. Медвежий озера (Моск. обл.). На рис. 1.7 показан общий вид этого инструмента. Диаметр главного квазипараболического зеркала 64 см. Оно близко к параболоиду вращения с фокусным расстоянием 23,4 м. Угол раскрыва зеркала 137° . Радиотелескоп установлен на азимутально-угломестном опорно-поворотном устройстве. Для облучения зеркала выбрана схема Грегори с переотражающим квазизллиптическим зеркалом диаметром 6 м. В однозеркальном режиме радиотелескоп эффективно работает на длинах волн более 40 см. Сектор поворота по углу места от 0 до 90° , по азимуту $\pm 295^\circ$. Суммарная среднеквадратичная погрешность поверхности зеркальной системы σ на момент ввода инструмента составляла 2,4 мм. После дополнительных мер σ уменьшена до 1,5 мм.

В схему конструкции силового каркаса зеркала заложен принцип согласованных деформаций, поэтому при наклонах рефлектора массой 750 т среднеквадратичные значения отклонения поверхности от расчетного профиля не превосходят 1 мм.

Каркас рефлектора выполнен по радиально-симметричной схеме. Его пространственная конструкция состоит из радиальных ферм и кольцевых поясов, объединенных косыми связями. Он опирается на промежуточную конструкцию с введением в каждый узел его крепления специального при-

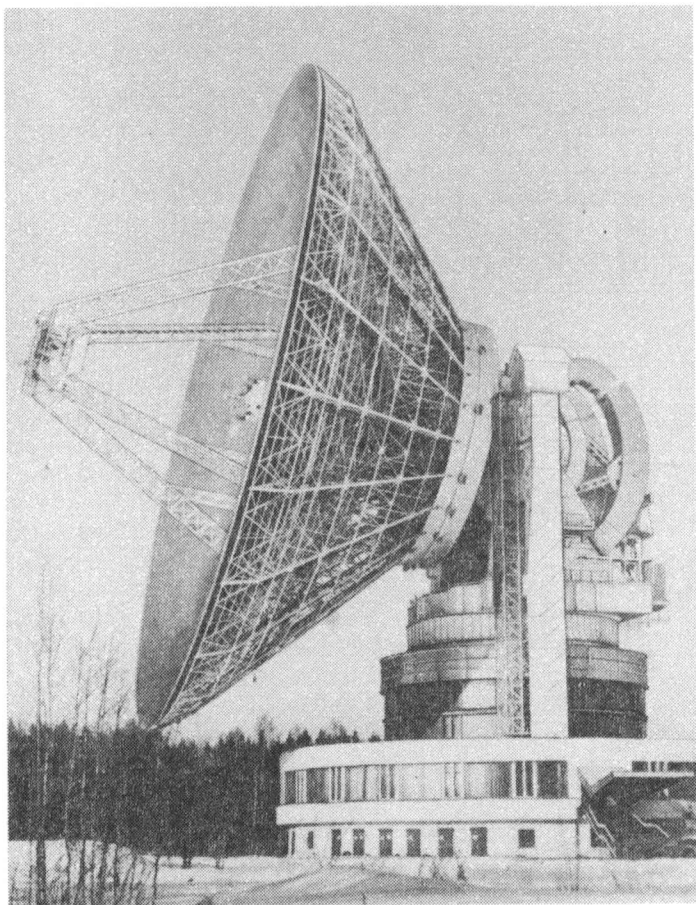


Рис. 1.7. Радиотелескоп РТ-64 (ТНА-1500)

жинного компенсатора (рис.1.8). С его помощью достигается требуемая величина равноподатливости узлов крепления каркаса и минимальная асимметрия в гомологических деформациях зеркала. Она обычно появляется в районе крепления рефлектора к угломестной оси. На рис. 1.8 показана схема подвески зеркала к опорно-поворотному устройству.

Отражающая поверхность рефлектора изготовлена из панелей, представляющих собой секцию, вырезанную из параболоида. Среднеквадратичное отклонение поверхности панели от параболической формы составляет 0,25 мм. Конструктивно панели изготовлены из листа алюминия толщиной 1,5 мм, подкрепленного профилированными ребрами жесткости. Панели размерами около 1,5 X 1,5 м крепятся к каркасу рефлектора в четырех точках с помощью винтовых устройств. Регулировка этих устройств по высоте выполняется со стороны отражающей поверхности. Панели устанавливают так, чтобы получилась квазипараболическая форма поверхности реф-

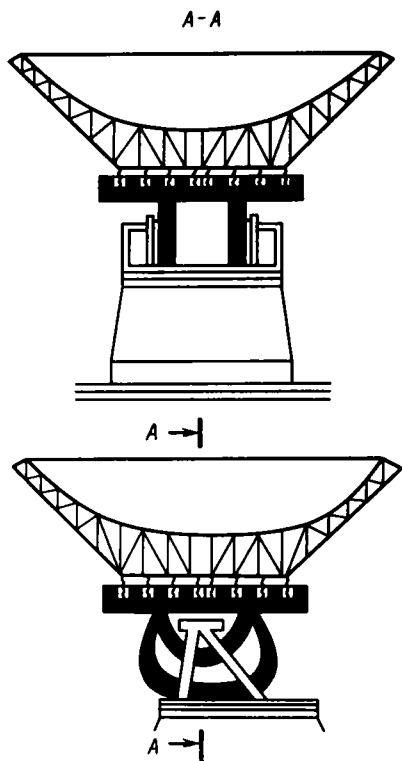


Рис. 1.8. Схема подвески зеркала РТ-64 к опорно-поворотному устройству [24]

лктора. При таких небольших размерах панелей систематические отклонения от аппроксимирующей формы незначительны.

Впервые в практике отечественного радиотелескопостроения сборка рефлектора проводилась сразу на опорно-поворотном устройстве. При этом была получена большая экономия времени и средств. Регулировка высоты шпилек, настил панелей и их предварительная выверка осуществлялись с применением так называемого цепного шаблона, собранного из отдельных блоков-шаблонов, которые соединены между собой осями шарнирных узлов. Центральный блок-шаблон крепится к сферической опоре, центр которой находится на фокальной оси рефлектора. Промежуточные блоки опираются в местах шарнирных сочленений через регулируемые приспособления на ролики, которые движутся по концентрическим путям. Та-

кой "многоопорный" шаблон использовался для предварительной выверки, а также и как транспортное средство для доставки панелей к месту их монтажа. Основная юстировка поверхности проводилась по специально созданному профилометру на основе лазерного дальномера, собственная погрешность которого порядка 0,1 мм. Профилометр обеспечивает высокоточные измерения координат реперных точек поверхности зеркала при любом его угле места. Он оперативно связан с ЭВМ.

Радиотелескоп РТ-64 установлен на железобетонной опоре (башне) с жестким каркасом, несущим 40% массы опорно-поворотного устройства. В этой башенной опоре (здании) размещены системы управления, энергообеспечения и аппаратура (полезная площадь более 1000 м²). На верху башни, на опорном столе, установлен азимутальный роликовый погон диаметром 18 м, по которому поворотное устройство вращается на 40 регулируемых опорных катках. Диаметр катка 800 мм. Ошибка выравнивания опорных катков по горизонту не более 0,2 мм.

Два отдельных двухскоростных привода работают одновременно для вращения радиотелескопа по азимуту. В угломестном приводе имеются также два независимых силовых привода, работающих на одну исполнительную ось. Два подковообразных противовеса зеркала использованы для выбора люфтов в цевочном зацеплении угломестного привода. Скорости вращения по азимуту — 1,5°/с (большая) и 2'/с (малая), по углу

места $1,1^{\circ}/с$ (большая) и $1,5'/с$ (малая). Среднеквадратичная угловая погрешность наведения около $10''$.

В высокоточной системе управления радиотелескопом использованы 20-разрядные датчики углового положения типа "Индукосин" с ценой деления младшего разряда $1,24''$. С такой дискретностью проводится программное наведение радиотелескопа в замкнутом цифровом режиме с ЭВМ в контуре управления [33].

Компенсация изменения параметров рефлектора из-за гомологических деформаций проводится с помощью перемещений вторичного зеркала. В первом варианте радиотелескопа РТ-64 были предусмотрены лишь продольное перемещение вторичного зеркала вдоль оси и его угловые повороты. В модифицированном варианте оно может перемещаться и в поперечном направлении. Погрешность автоматического регулирования положения квазиэллиптического вторичного зеркала 0,5 мм. Дополнительно для компенсации угловых отклонений луча радиотелескопа из-за деформаций башенной опоры и зеркала создана система автокомпенсации, основу которой составляют дискретные оптические датчики углового смещения той части конструкции, где смонтирован облучатель (или отражатель), относительно разгруженных приборных конструкций, на которых размещены приемники (или излучатели). Такая оригинальная система автоматической фокусировки и угломестной компенсации с использованием оптико-электронных датчиков на независимых опорных базах значительно увеличивает эффективность работы радиотелескопа РТ-64 в коротковолновом сантиметровом диапазоне.

Высокий коэффициент использования поверхности инструмента обеспечивается рядом конструктивных решений. Выбрана квазипараболическая форма главного зеркала. Приняты специальные меры по уменьшению рассеяния облучателя. Используются первичные "скалярные" облучатели (рупоры с импедансными стенками), что обеспечивает хорошее "освещение" вторичного зеркала с низким уровнем поля на краю (-19 дБ). В центре вторичного зеркала установлена конусообразная конструкция, дающая минимальный уровень поля на центральной кабине облучателя. Приняты меры по минимизации затенения поверхности опорами вторичного зеркала.

Параметры радиотелескопа, полученные на длине волны 7 см, приведены ниже (звездочкой отмечено значение, полученное обычными соотношениями путем пересчета опубликованных данных):

Ширина диаграммы направленности	$45' \times 45'$
Эффективная площадь $A_{эф}$	2000 м^2
Коэффициент использования поверхности K	0,65
Коэффициент направленного действия G	$67,1 * \text{дБ}$
Коэффициент рассеяния β	0,3
Шумовая температура $T_{ш}$	10 К

При создании конструкции радиотелескопа большое внимание было обращено на экономичность ее изготовления и монтажа. Основные узлы радиотелескопа [17] имеют следующие объем и массу: строительная часть 10^4 м^3 , опорно-поворотное устройство 3250 т, зеркальная система 750 т.

Разработана модификация радиотелескопа РТ-64, масса которого примерно вдвое меньше.

Сопоставление параметров радиотелескопа РТ-64 и зарубежных инструментов такого же класса (радиотелескопы НАСА (США, Голдстоун) и КСИРО (Австралия, Паркс)) показывает, что советский инструмент значительно превосходит по качеству эти крупные антенные системы сантиметрового диапазона. Созданный при сравнительно невысоких затратах этот радиотелескоп как универсальный инструмент может быть эффективно использован по широкой программе радиоастрономических исследований.

Радиотелескоп РТ-70 [15, 16, 38, 51–53]. В ноябре 1978 г. в районе Евпатории (Крым) была введена в действие новая антенна РТ-70 ЦДКС. Эта антенна, одна из крупнейших в мире, используется для космической связи и радиоастрономических наблюдений, а также для радиолокационной астрономии.

При разработке и создании этого инструмента, предназначенного для работы в коротковолновой части сантиметрового диапазона волн, использованы современные конструктивные решения и передовая технология монтажа. На рис. 1.9 представлен общий вид телескопа РТ-70.

Диаметр основного квазипараболического зеркала 70 м. Профиль этого зеркала близок к параболе с фокусным расстоянием 21 м, угол раскрыва — 159° . Антенна смонтирована на азимутально-угломестном поворотном устройстве. Облучение проводится по схеме Грегори. Диаметр вторичного квазиэллиптического зеркала 7 м. На волнах длиннее 40 см радиотелескоп успешно работает с облучением из первичного фокуса. Сектор поворота телескопа по углу места от 0 до 90° , по азимуту $\pm 270^\circ$. Среднеквадратичная погрешность поверхности основного зеркала (по геодезическим измерениям) изменяется от 0,5 мм в центре до 0,9 мм на краю. Такие результаты были получены после нескольких этапов юстировки поверхности, у которой среднеквадратичное отклонение от рассчитанной формы последовательно уменьшалось с 3 мм в 1978 г. и 1,4 мм в 1980 г. до 0,87 мм в 1981 и 0,77 мм в 1982 г. [53].

Конструкция зеркала рассчитана на согласованные деформации [15], так что при наклонах рефлектора по углу места его форма остается фигурой вращения, а для компенсации фазовых искажений в раскрыве с целью сохранения КНД предусмотрены программные перемещения вторичного зеркала системы Грегори вдоль фокальной линии и поперек нее с одновременным поворотом этого зеркала по углу. Возникающие при этом отклонения направления приема компенсируются доворотом по углу места зеркальной системы. На рис. 1.10 приведена конструктивная схема радиотелескопа РТ-70 [52]. Цифры у точек показывают места сочленения основных узлов: каркаса зеркала (а), опор малого зеркала (б), основания зеркальной системы (в), опорно-поворотного устройства (г). Каркас зеркала выполнен по радиально-симметричной схеме, в которой число радиальных ферм увеличивается от вершины зеркала к его периферии. Каркас (а) крепится к его основанию (в) в 13 точках в сечениях 1–1 и 2–2 (см. рис. 1.10). Радиальные фермы связаны между собой кольцевыми поясами и диагональными раскосами, что помогает в реализации согласованных деформаций.

В конструкции основания зеркальной системы (в) установлены верхняя и нижняя восьмигранные пирамиды с общим основанием. Через их верши-

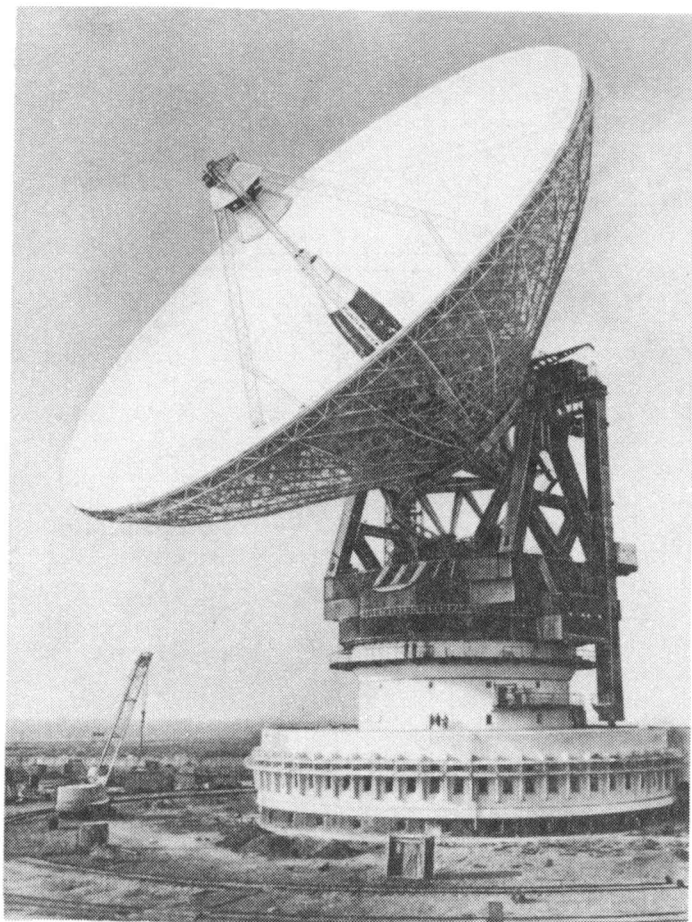


Рис. 1.9. Радиотелескоп РТ-70

ны проходит центральная труба, на конце которой устанавливаются сменные кабины с облучателем. Восемь вершин общего основания пирамид связаны с трубой спицами, две из которых (более мощные) используются как горизонтальная ось (сечение 3–3'), а две связаны с сектором угломестного поворота (точка 5 на рис. 1.10).

На платформе опорно-поворотного устройства установлены две А-образные стойки угломестной оси. Сама платформа с центрирующим штырем для восприятия радиальных нагрузок вращается на шаровом погоне, который представляет собой специальный опорный подшипник диаметром 22 м. В погон уложено 340 шаров диаметром около 150 мм. Горизонтальность погона выверена с погрешностью 0,1 мм на диаметре 22 м.

Масса вращающихся частей по азимуту радиотелескопа РТ-70 составляет 4000 т, а по углу места—1400 т, при этом на долю уравнивающего

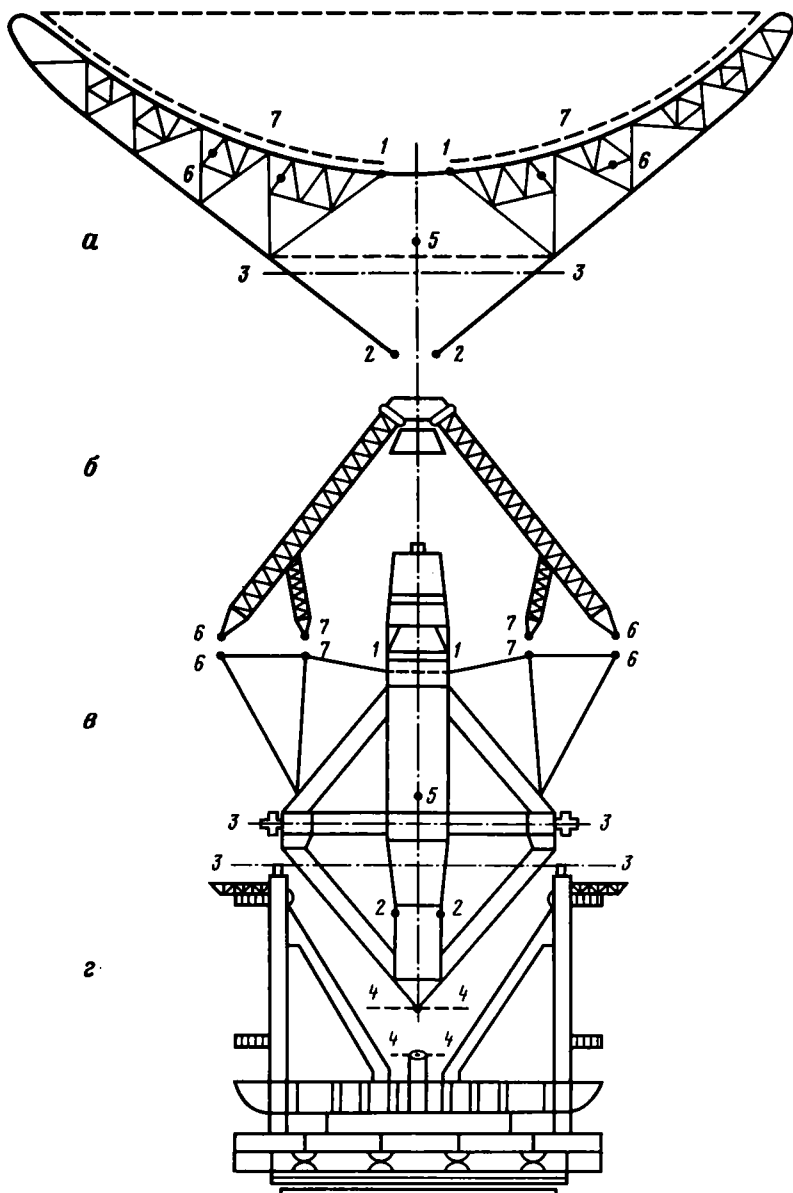


Рис. 1.10. Схема радиотелескопа РТ-70 [52]

a — каркас зеркала; *б* — опоры вторичного зеркала; *в* — основание зеркальной системы; *г* — опорно-поворотное устройство

балласта приходится 300 т в азимутальной платформе и 380 т в поворачиваемой по углу места зеркальной системе.

Приняты специальные меры для конструктивной развязки четырех опор вторичного зеркала от основного зеркала.

Отражающая поверхность телескопа изготовлена из 1138 алюминиевых предварительно отформованных панелей толщиной 3 мм. Размеры панелей меняются от $2,5 \times 0,6$ до $2,5 \times 2$ м. Они устанавливались на обрешетке рефлектора с помощью регулируемых по высоте стоек (шпинелек). Выверка их установки выполнялась с применением оптико-геодезических методов. Суммарная относительно высокая технологическая точность поверхности зеркала порядка 0,5 мм была достигнута благодаря методам выверки точности изготовления панелей и тщательной юстировке их положения.

Так же как и в случае РТ-64, сборка узлов РТ-70 велась на монтажной площадке. Был применен последовательно-параллельный монтаж с укрупнением узлов. Фрезеровка угломестного сектора поворота под установку сегментов зубчатого венца была проведена с помощью станка, установленного на платформе опорно-поворотного устройства с подачей сектора под обработку путем наклона качающейся части в штатных цапфах угломестной оси.

Опорно-поворотное устройство радиотелескопа РТ-70 установлено на железобетонном здании-башне, где размещены системы энергообеспечения и управляющий вычислительный комплекс.

Быстрые скорости поворотов инструмента составляют: $30'/с$ по азимуту, $15'/с$ по углу места; медленные скорости — до $4'/мин$. Вращение по азимуту выполняется с помощью двух приводных диаметрально установленных на азимутальной платформе механизмов с зубчатым зацеплением с неподвижно закрепленным на пилоне зубчатым ободом. Поворотный механизм по углу места связан зубчатой передачей с поворотным сектором. Приняты меры для выбора люфтов в передачах.

В высокоточной системе управления радиотелескопом применены электросиловые приводы тиристорного типа с преобразователями согласованного управления. В нем используются цифровые датчики положения осей с ценой деления младшего разряда $5''$. В контуре электрического следящего привода инструмента установлена управляющая ЭВМ М-6000. Среднеквадратичная ошибка обработки приводом программных координат порядка $5''$ при скорости ветра не более $10 м/с$ [52].

Позиционный следящий привод переменного тока с дискретной обработкой угла рассогласования используется для программного перемещения вторичного зеркала вдоль и поперек фокальной оси при наклонах инструмента по углу места.

Так же как и в радиотелескопе РТ-64, создана автоматизированная оптическая система измерения координат положения РТ-70 по развязанным реперным базам. Показания индикаторных устройств смещения осей вращения радиотелескопа из-за деформаций его конструкций вводятся для коррекции в ЭВМ. Такая система компенсации, объединенная с управлением положением малого зеркала, обеспечила эффективную работу радиотелескопа, особенно на коротких сантиметровых волнах.

Получены высокие радиотехнические параметры радиотелескопа. Коэффициент использования поверхности K (без учета неровностей рефлектора)

Таблица 1.4

λ , см	Ширина диаграммы направленности, угл. мин	$A_{эф}$, м ²	K	G , дБ	β	$T_{ш}$, К	Литература
40	20	3010	(0,78)	(53,7)	(0,37)	12,1 + + 2,35 $\cos \epsilon h$	[38]
30	16,5	3000	(0,78)	(56,2)	(0,34)	12	[53]
6	2,57	2849	(0,74)	(70,0)	(0,55)	11,3 + + 2,44 $\cos \epsilon h$	[38]
	3,0	2900	(0,75)	(70,0)	(0,39)	10	[53]
5	2,36	2792	(0,73)	(71,5)	(0,47)	10	[38]
	2,6	2850	(0,74)	(71,6)	(0,35)	9,6	[53]
3	1,5	2240	(0,58)	(74,9)	(0,53)	10,2±2,9	[38]
	1,7	2400	(0,62)	(75,2)	(0,36)	10	[53]
1,35	0,75	1250	(0,32)	(79,4)	(0,67)	—	[53]
0,8	0,53	620	(0,16)	(80,8)	(0,77)	—	[53]

Примечание. Для $\lambda = 30 \div 40$ см малое зеркало неподвижно; для $\lambda = 3 \div 6$ малое зеркало перемещают при наклоне радиотелескопа по углу места h в соответствии с законом $125 \cos h + 3,2 \cos h$; для $\lambda = 0,8 \div 1,35$ положение малого зеркала подбирается вручную.

составляет 0,75–0,8. Такое высокое значение достигнуто благодаря внедрению принципа согласованных деформаций в конструкцию инструмента, применению квазипараболической формы главного рефлектора, двухзеркальной системе облучения, малому рассеянию первичного облучателя, который дает на краю малого зеркала уровень поля 20 дБ. При этом в раскрыве реализуется почти прямоугольное распределение поля с резким спадом до 13 дБ на его краю и с глубоким провалом в центре для снижения реакции вторичного зеркала на облучатель и уменьшения рассеяния энергии центральной кабиной, где установлены первичные облучатели и высокочастотные блоки аппаратуры. В суммарный КИП входят как сомножители следующие коэффициенты [53]: апертурный $K_1 = 0,985$; затенения опорами вторичного зеркала $K_2 = 0,902$; кросс-поляризации $K_3 = 0,998$; "переливания" за край малого зеркала $K_4 = 0,98$; дифракционного рассеяния на малом зеркале K_5 , изменяющийся от 0,95 до 0,983 в диапазоне волн от 40 до 0,8 см соответственно. Для быстрой смены рабочей волны инструмента создана вращающаяся перископическая система по двухзеркальной схеме. С ее помощью фокальная точка смещается с оптической оси зеркала на 1,5 м. По периметру окружности этого радиуса размещены шесть первичных облучателей многомодового типа [45]. Дополнительные потери КИП с этой системой не более 5–10%.

Следует особенно подчеркнуть достигнутую высокую точность поверхности зеркала и сравнительно небольшие деформации его конструкции, позволяющие сохранить форму при поворотах радиотелескопа. При достигнутом среднеквадратичном отклонении поверхности основного зеркала 0,77 мм (1982 г.) потери КИП из-за рассеяния на шероховатостях рефлектора начинают проявляться лишь на волнах короче 3 см, где они состав-

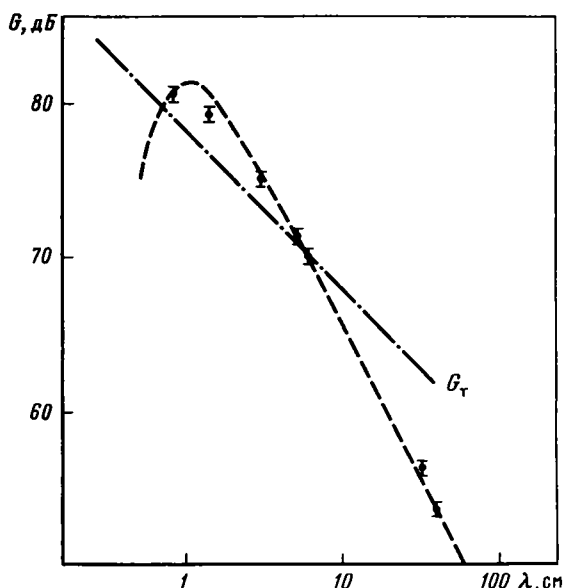


Рис. 1.11. Изменение КНД радиотелескопа РТ-70 в диапазоне длин волн

Штриховая линия — расчет ($K = 0,75$; $\sigma = 0,77$ мм); штрихпунктирная — гравитационный предел негомологических конструкций G_T ; значки — экспериментальные значения

ляют более 10%. В табл. 1.4 приведены данные, полученные в результате натурных испытаний (в скобках даны параметры, вычисленные по опубликованным в [38, 53] данным). На рис. 1.11 показана расчетная зависимость $G(\lambda)$ для суммарного КИП $K = 0,75$ и среднеквадратичного отклонения поверхности $\sigma = 0,77$ мм (по значениям из рис. 1.2). Здесь же даны соответствующие экспериментальные данные из табл. 1.4. Совпадение экспериментальных и расчетных значений хорошее. Эти результаты показывают, что радиотелескоп РТ-70 работает вплоть до волн миллиметрового диапазона. Его эффективная площадь может быть увеличена в этом диапазоне, так как основную долю в суммарную среднеквадратичную погрешность вносят технологические ошибки установки панелей отражателя (около 0,7 мм [53]). Кроме того, еще не полностью использованы возможности, которые дают малые деформации конструкции РТ-70.

На радиотелескопе РТ-70 проводился цикл радиолокационных исследований планет Меркурий, Венера, Марс. С его помощью были осуществлены исследования пульсаров и наблюдения радиолиний. С использованием РТ-70 и установленного на станции "Салют-6" радиотелескопа КРТ-10 был создан первый интерферометр с космической базой [9]. Большой объем работ выполняется на этом инструменте по программе исследования космического пространства с помощью искусственных спутников Земли и автоматических межпланетных станций, а в мае 1985 г. после ввода в строй второй антенны РТ-70 на Дальнем Востоке в СССР начал функционировать многоэлементный радиоинтерферометр со сверхдлинной базой, успешно принявший сигнал от радиозондов в атмосфере Венеры [45] (см. также гл. 2).

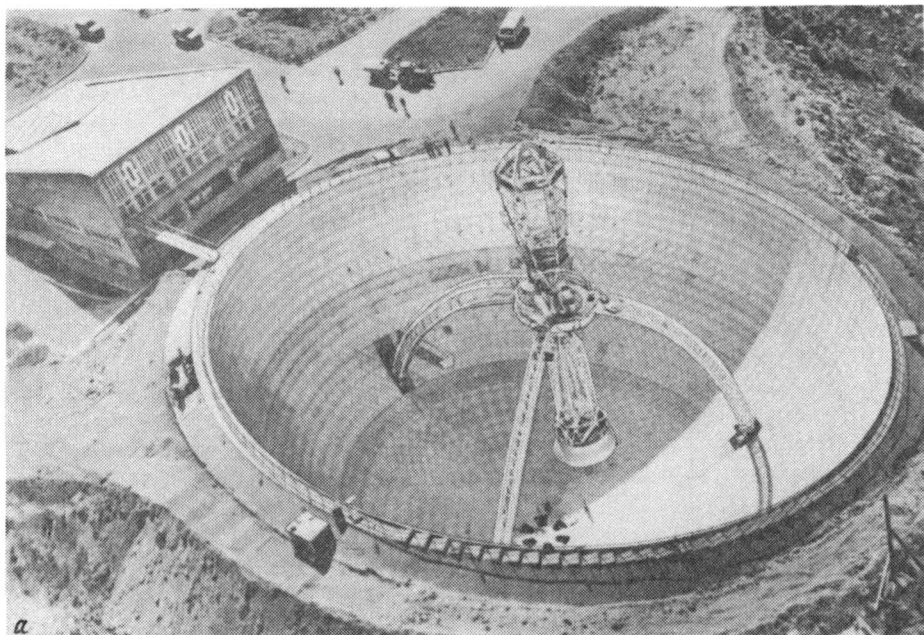


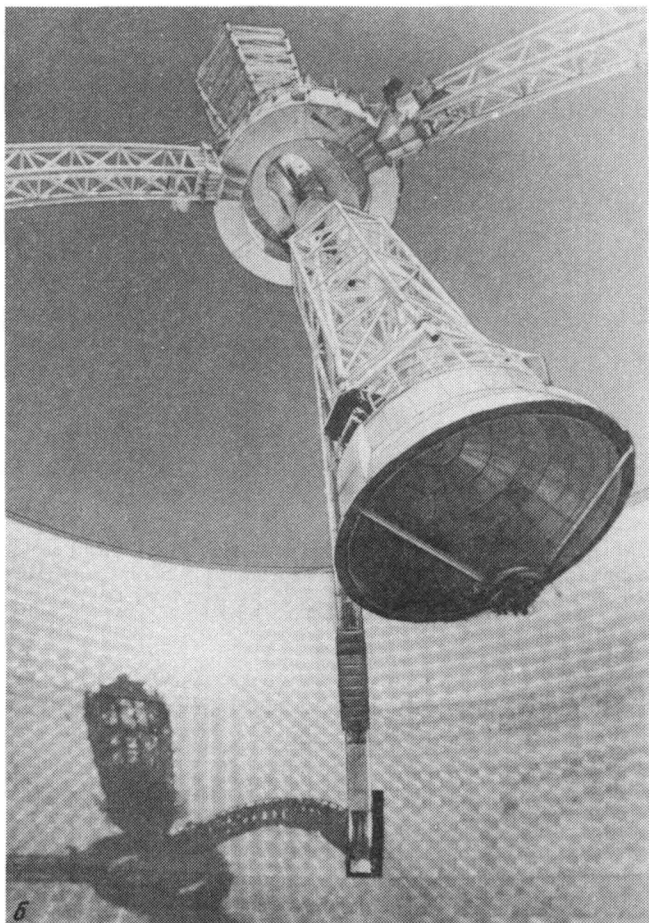
Рис. 1.12. Главное зеркало (схема Геруни) (а) и облучающая система радиотелескопа (б) РТ-2,6/32/54 ВНИИРИ

Радиотелескоп РТ-2,6/32/54 ВНИИРИ [54–56, 58–60]. В 1985 г. было закончено строительство крупного радиотелескопа миллиметровых волн со сферическим неподвижным рефлектором. Радиотелескоп расположен на высоте 1800 м над уровнем моря, на южном склоне горы Арагац (Армения), на территории Государственного эталонного центра антенных измерений. Основные принципы построения этой антенной системы были проверены на макете с диаметром главного зеркала 5 м [57]. На рис. 1.12 показаны главное зеркало и облучающая система радиотелескопа.

Неподвижное основное зеркало телескопа в виде полусферы расположено в земле, в бетонной чаше диаметром 60 м, наклоненной на юг на 15° от зенита. Диаметр главного зеркала 54 м. В наблюдениях используется раскрыв диаметром 32 м. Корректирующее подвижное вторичное зеркало, диаметр раскрыва которого около 5 м, подвешено на специальной трехопорной конструкции так, что расстояние от центра сферы главного рефлектора до его вершины составляет около 13,5 м (половина радиуса сферы рефлектора). Приводные механизмы этого вторичного зеркала поворачивают его вокруг двух осей и перемещают в пространстве, с тем чтобы менять направление приема сигналов и следить за объектом наблюдения.

С помощью радиотелескопа РТ-2,6/32/54 можно проводить обзор неба в пределах конуса с углом при вершине 120° без уменьшения эффективной площади. При географической широте места установки 40° сектор обзора находится в пределах от -35 до 85° .

Поскольку инструмент рассчитан для работы на коротких миллиметро-



вых волнах, к его конструкции, технологии изготовления и юстировке предъявлялись высокие требования. Бетонная чаша, созданная в естественной выемке, в которой были проведены взрывные, скальные и дренажные работы, обеспечивает высоконадежный стабильный жесткий фундамент для главного зеркала.

На конструкциях, заложенных в бетонной чаше, установлены металлические стойки высотой 1,8 м, на которые положены панели рефлектора. В процессе юстировки высота их установки регулировалась на стойках винтовыми шпильками с мелким шагом резьбы. Всего в рефлекторе установлено около 4000 панелей со средним размером порядка 1 X 1 м. Они отлиты из сплава алюминия с цинком и обработаны на карусельном станке по копиру с радиусом кривизны 27 м. Среднеквадратичная ошибка поверхности панели не превышает 10 мкм. Установка панелей в рефлекторе по сфере с погрешностью не более 100 мкм велась с помощью специально разработанного фазового радиодальномера на длине волны 8 мм с исполь-

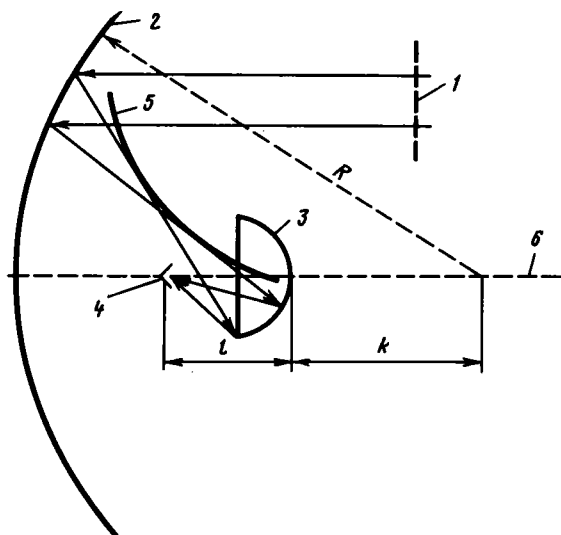


Рис. 1.13. Схема хода лучей в радиотелескопе со сферическим отражателем

1 — плоский фронт; 2 — сферическое зеркало; 3 — корректирующее зеркало; 4 — первичный облучатель; 5 — каустика; 6 — ось радиотелескопа

зованием лазера. Погрешность прибора около 10 мкм. Для сферического рефлектора проблема юстировки поверхности по сравнению с параболоидом упрощается, так как здесь при хорошей сферичности панелей требуется выдерживать только равенство их расстояния от центра сферы [56].

Высокие требования предъявляются и ко вторичному зеркалу (как к точности его поверхности, так и к управлению его движением). Вторичное зеркало, корректирующее сферическую aberrацию главного, представляет вогнутую поверхность вращения специальной формы. Осевое сечение вторичного зеркала является огибающей семейства эллипсов с одним общим фокусом, совпадающим с первичным облучателем и вторыми фокусами, которые лежат на фокальной кривой (каустике) в точках касания ее лучами, отраженными от главного зеркала. Таким образом, каждый элемент корректирующего зеркала работает по схеме Грегори относительно пучка лучей, параллельных оси телескопа, отстоящих от нее на соответствующее расстояние.

При определенных значениях расстояний от первичного облучателя до вершины корректирующего зеркала l и от нее до центра сферического зеркала k плоский фронт преобразуется в сферический, сходящийся в первичном облучателе (рис. 1.13). Различным значениям k и l соответствуют форма и размеры корректирующего зеркала, а также значение КИП радиотелескопа. Диаметр вторичного зеркала около 5 м, глубина по оси порядка 2,5 м, расстояние от фокуса до вершины малого зеркала около 3,4 м. Отклонения поверхности вторичного зеркала от заданного профиля, вызванные технологией изготовления, а также деформациями при поворотах, составляют порядка 0,5–0,1 мм. Каркас вторичного зеркала специальной конструкции из 24 секций собран на кольце жесткости. Оно служит для

крепления зеркала к трехстержневой опоре. Отражающая поверхность этого зеркала собрана из титановых плит, обработанных по копиру на карусельном станке и установленных на каркасе на регулируемых по высоте шпильках. Снаружи каркас малого зеркала обшит алюминиевым листом для экранировки от солнечного нагрева, повышения аэродинамических свойств и создания обогреваемого зимой объема [58].

Каждая из трех опор подвески вторичного зеркала установлена на шаровом шарнире и домкратном механизме для компенсации изменения ее длины из-за температурных деформаций с погрешностью не более 0,1 мм с помощью следящей системы, включающей фотодатчики лазерного луча. Предусмотрены автоматизированные системы также для компенсации температурных и весовых деформаций конструкций, несущих вторичное зеркало. Контроль его положения в пространстве проводится с помощью специально созданной системы с лазером, установленным в центре большой сферы на независимой экваториальной монтировке. Точность угловой установки малого зеркала не хуже 2". Система управления радиотелескопом РТ-2,6/32/54 автоматизирована с использованием ЭВМ [59].

Первичные сменные облучатели с высокочастотной приемной аппаратурой устанавливаются в фокусе вторичного зеркала. Расчетное значение КИП антенны составляет 0,7 на волнах от 2 мм до 0,75 м, эффективная площадь 560 м². Ожидаются низкие собственные шумы антенны порядка 10 К, ширина луча около 10" и КНД более 90 дБ на длине волны 2 мм.

РТ-2,6/32/54 является единственным в мире радиотелескопом миллиметрового диапазона волн со сферическим неподвижным главным зеркалом большого диаметра. Поскольку для литой поверхности, обработанной, отжужированной и жестко закрепленной на бетонном основании, сведены к минимуму гравитационные, температурные и ветровые деформации, то можно ожидать высокую стабильность его параметров. Первые наблюдения были проведены в июне 1985 г. на волне 20 см, а на волне 8 мм — в 1986 г.

В качестве противовеса малого зеркала использован оптический телескоп диаметром 2,6 м (масса 4 т). Оси радио- и оптического телескопов совмещены. В будущем, возможно, будут проводить наблюдения объектов на этом инструменте одновременно в радио-, ИК- и оптических диапазонах.

Выше описывались зеркальные радиотелескопы, предназначенные для измерений с поверхности земли. В Советском Союзе были разработаны и испытаны первые образцы зеркальных радиотелескопов, предназначенных для установки на космических аппаратах. Это субмиллиметровый телескоп БСТ-1М ФИАН и космический радиотелескоп КРТ-10 ИКИ.

К обычным трудностям построения наземных радиотелескопов добавляются проблемы, определяемые условиями размещения и работы на борту космического аппарата сложного комплекса телескопа. Следует подчеркнуть, например, что прием субмиллиметрового излучения космических объектов с высокой чувствительностью возможен лишь при глубоком охлаждении как широкополосных приемников на основе болометров и фоторезисторов, так и детекторов, аналогичных применяемым на СВЧ. В бортовых условиях эта сама по себе сложная задача оказывается еще сложнее.

Субмиллиметровый телескоп БСТ-1М ФИАН [9, 61а]. Для работы на пилотируемой орбитальной станции "Салют-6" в 1977 г. был создан первый макет субмиллиметрового телескопа БСТ-1М с главным зеркалом диамет-

ром 1,5 м. На борту станции "Салют-6" он включался с 1977 до 1981 г., что позволило накопить ценную информацию о функционировании крупных телескопов на пилотируемых орбитальных станциях [9].

Телескоп был размещен в отсеке научной аппаратуры станции "Салют-6" и установлен на карданном подвесе для более точного автономного наведения в пределах $\pm 5^\circ$ от среднего положения оси объектива. Оптическая система телескопа была выполнена по двухзеркальной схеме Кассегрена. В макете было применено относительно недорогое стеклянное параболическое зеркало с наружным алюминированием с коррекцией его зональных ошибок соответствующей ретушью гиперболического зеркала по разработанной методике [61а]. Эффективный размер фокального пятна составил около 20 мм. При диаметре входного окна приемной системы около 30 мм было получено поле зрения телескопа $18'$, что согласовывалось с погрешностью наведения порядка $2'-3'$.

В телескопе использовалась перископическая зеркальная система, которая вместе с модуляторами образовывала оптический блок. Была обеспечена диаграммная модуляция с помощью вращения бисекторного зеркала модулятора с частотой 185 Гц, когда излучение источника, находящегося на главной оптической оси инструмента, сравнивалось с излучением области, отстоящей от оси на $22'$. В другом режиме модуляции (амплитудной) на пути излучения в оптическом блоке вводился калибратор в виде зачерненной пластины, которая сама являлась источником теплового излучения. При вращении модулятора излучение из области с центром на главной оси сравнивается с излучением от калибратора. Интерференционные фильтры, установленные перед входным окном световода, определяли рабочий диапазон волн.

Чувствительные приемники были установлены в охлаждаемой камере. Приемник на германиевом фоторезисторе принимал излучение в области 60–130 мкм (канал ИК), а приемник на основе антимонида индия — на волнах длиннее 300 мкм (канал СМ). Кроме этого, в составе телескопа использовался неохлаждаемый приемник УФ-диапазона (0,2–0,26 мкм). Низкотемпературное термостатирование приемников ИК- и СМ-каналов проводилось с помощью активной системы охлаждения. Она представляет собой бортовой гелиевый рефрижератор замкнутого типа с трехкаскадным дроссельным циклом, использующий двухкаскадное охлаждение с помощью газовых холодильных машин. Эта система обеспечивала температуру термостатирования 4,2–4,8 К [61б].

Усилительно-регистрирующая система телескопа БСТ-1М ФИАН служила для усиления сигналов на частоте модуляции и их преобразования. Управление работой телескопа БСТ-1М велось с помощью системы управления с пульта оператора. Можно было выполнять автоматически слежение за источником не слабее звездной величины 2^m ; полуавтоматическое наведение и сканирование по двум осям в пределах квадрата размерами $2,5^\circ \times 2,5^\circ$. Некоторые параметры телескопа БСТ-1М ФИАН приведены ниже.

Диаметр первичного параболического зеркала	1500 мм
Диаметр вторичного гиперболического зеркала	250 мм
Фокусное расстояние объектива	5013 мм

Максимальная чувствительность	
ИК-канал	$2 \cdot 10^{-12} \text{ Вт/Гц}^{1/2}$
СМ-канал	$1 \cdot 10^{-12} \text{ Вт/Гц}^{1/2}$
Среднеквадратичная ошибка сопровождения	2'

Установленный на борту орбитальной научной станции "Салют-6", телескоп БСТ-1М ФИАН был впервые включен в феврале 1978 г. космонавтами Ю.В. Романенко и Г.М. Гречко для настройки и испытания. В июне — сентябре 1978 г. космонавты В.В. Коваленок и А.С. Иванченков продолжили эксперименты с телескопом.

Орбитальная научная станция "Салют-6" в 1979 г. была использована также и для установки на ней космического радиотелескопа КРТ-10 с диаметром зеркала 10 м [9, 62]. Этот радиотелескоп сантиметровых волн был использован для опробования в режиме интерферометра совместно с наземным радиотелескопом РТ-70 [52].

Радиотелескоп КРТ-10 [9, 62] с раскрывающимся параболическим зеркалом диаметром 10 м был доставлен на борт орбитальной станции "Салют-6" 30 июня 1979 г. грузовым кораблем "Прогресс-7". После ухода корабля от космической станции "Салют-6" 18 июля 1979 г. антенная система КРТ-10 была выдвинута и раскрыта. Работа с КРТ-10 продолжалась до августа 1979 г. [9].

Космический радиотелескоп КРТ-10 предназначен для работы на длинах волн 12 и 72 см. Он состоит из пятилучевой двухдиапазонной остроуправленной зеркальной антенны, пятиканального двухдиапазонного высокочувствительного радиометра и аппаратуры управления. Зеркало антенны выполнено в виде пространственной конструкции, в которой две поверхности (опорная и отражающая) образованы натянутыми тросиками диаметром 1 мм и соединены узлами с пружинными механизмами в треугольные ячейки с максимальным размером 1 м. Необходимая конфигурация зеркала определяется длиной тросиков [62]. Для отражающей поверхности зеркала применено трикотажное сетеполотно из металлических нитей диаметром 50 мкм. После изготовления сетеполотно покрыто тонким слоем металла с высокой электрической проводимостью.

Облучатель из четырех рупоров на длину волны 12 см и спирали на длину волны 72 см укреплен на корпусе фокального контейнера, внутри герметичного отсека которого установлена СВЧ-часть радиометра. Этот контейнер с облучателем и аппаратурой устанавливается в зеркале на трехопорной раскладной системе. В развернутом виде каждая опора представляет собой трехгранную ферму длиной 5 м. В сложенном виде длина опоры 0,27 м. Вдоль опор и по конструкциям зеркала продолжены кабели от фокального контейнера к аппаратуре, установленной на станции.

Основные параметры радиотелескопа КРТ-10 приведены ниже.

Диаметр параболического зеркала	10 м
Длина волны λ	12 и 72 см
Ширина диаграммы направленности по половинной мощности	
$\lambda = 12 \text{ см}$	1,0–1,3°
$\lambda = 72 \text{ см}$	5,5–6,0°
Флуктуационная чувствительность	0,2–0,3 К

Юстировка телескопа КРТ-10, проведенная космонавтами В.А. Ляховым и В.В. Рюминым после его развертывания, показала, что результаты соответствуют ожидаемым. С радиотелескопом КРТ-10 было проведено большое число геофизических исследований. Была опробована его работа с наземным радиотелескопом РТ-10 в режиме интерферометра [62]. Создание космического радиотелескопа КРТ-10 представляет собой новый шаг в развитии отечественного радиотелескопостроения теперь уже в условиях космоса.

1.2. Радиотелескопы с расчлененной зеркальной поверхностью

Как уже отмечалось, стремление к увеличению размеров и повышению точности отражающей поверхности стимулировало разработку радиотелескопов с отражателями, расчлененными на относительно небольшие, но прецизионные отражающие элементы, из которых можно строить расчетную поверхность с помощью инженерно-геодезических методов с относительной среднеквадратичной погрешностью $\sigma/L \cong 10^{-6}$, где L — наибольший размер зеркальной поверхности.

Так как технические трудности сооружения антенны и ее стоимость быстро растут с увеличением высоты H , а площадь антенны может быть увеличена более простыми средствами за счет развития горизонтального размера L , то радиотелескопы с расчлененной отражающей поверхностью состояются обычно из ряда относительно невысоких отражающих элементов, расположенных вдоль поверхности земли. Такие антенны имеют диаграммы направленности, близкие к ножевой, с разрешением в горизонтальном направлении более высоким, чем у симметричных антенн той же площади.

В Советском Союзе построены несколько радиотелескопов с расчлененной зеркальной поверхностью:

- 1) меридианный пассажный радиотелескоп РТ-25 $\times$ 2 НИРФИ под г. Горьким;
- 2) антенна переменного профиля (АПП) — Большой пулковский радиотелескоп (БПР) ГАО АН СССР;
- 3) радиотелескоп РАТАН-600 САО АН СССР в ст. Зеленчукской.

Последние два радиотелескопа построены по принципиально новой схеме [8], о чем будет сказано ниже.

Радиотелескоп РТ-25 $\times$ 2 [63–66]. Пассажный меридианный радиотелескоп РТ-25 $\times$ 2 был построен в 1969 г. Принципиальная схема антенной системы приведена на рис. 1.14. Она подобна антенне, предложенной Краусом [3–5]. Сигнал от источника излучения с помощью плоского отражателя, поворачиваемого вокруг горизонтальной оси, направляется на антенну — прямоугольную секцию, вырезанную симметрично из центральной части параболоида вращения диаметром 25 м с фокусным расстоянием 150 м и осью, наклоненной ниже плоскости горизонта на 1° . В фокальной плоскости антенны располагаются первичные облучатели. Оба отражателя РТ-25 $\times$ 2 (плоский перископ и параболическая антенна) состоят из 17 отдельных секций и имеют размеры: антенна — 25 $\times$ 2 м²

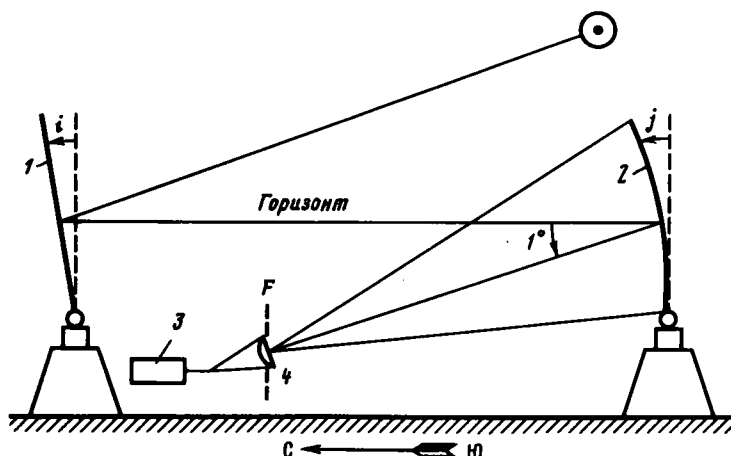


Рис. 1.14. Схема радиотелескопа РТ-25х2 НИРФИ

1 — плоский рефлектор; 2 — параболический рефлектор; 3 — радиометр; 4 — облучатель

(рис. 1.15, а), перископ — $25 \times 3 \text{ м}^2$ (рис. 1.15, б). Первичные облучатели рупорно-линзового типа установлены на общей подвижной каретке.

Большое фокусное расстояние радиотелескопа позволяет без заметных aberrаций горизонтально смещать первичные облучатели в фокальной плоскости антенны на $\pm 3,5 \text{ м}$ от электрической оси и осуществлять азимутальное сопровождение источника в течение 10–15 мин вблизи момента его кульминации.

Система дистанционно-программного управления движения каретки с облучателями и приемной аппаратурой обеспечивает установку облучателей в фокальной плоскости, сопровождение и сканирование источника по заданной программе, а также цифровую индикацию положения и скорости движения каретки. Радиотелескоп оснащен ЭВМ и аппаратурой для регистрации и обработки данных наблюдений.

Антенна телескопа юстируется с использованием геодезических, астрономических и оптико-механических методов. Среднеквадратичная ошибка отражающей поверхности отдельной секции $\sigma = 0,02 \text{ мм}$, а всей поверхности антенны — $0,1 \text{ мм}$. Оперативный контроль поверхности антенны и диаграмма направленности радиотелескопа проводится автоклиматическим методом (см. ниже).

Диаграмма направленности РТ-25х2 ножевого типа с отношением горизонтального размера к вертикальному $1/10$. На рис. 1.16 приведены сечения диаграммы направленности РТ-25х2, на которых видны также боковые лепестки. Время установки радиотелескопа в направлении наблюдаемого источника занимает около 30 мин.

На радиотелескопе РТ-25х2 проводятся наблюдения Солнца, Луны, газопылевых туманностей и дискретных источников в диапазоне $1\text{--}4,5 \text{ мм}$. Основные параметры радиотелескопа РТ-25х2 приведены ниже (следует заметить, что этот радиотелескоп НИРФИ является единственной в мире

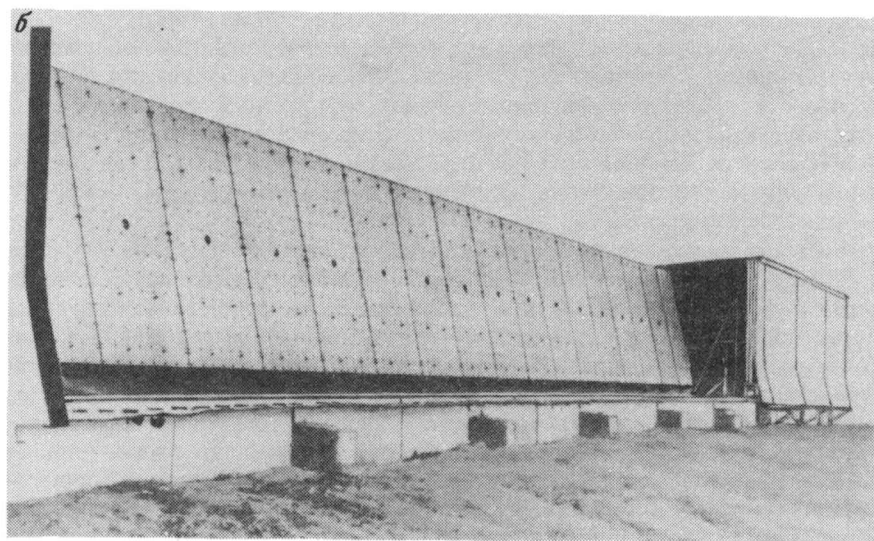
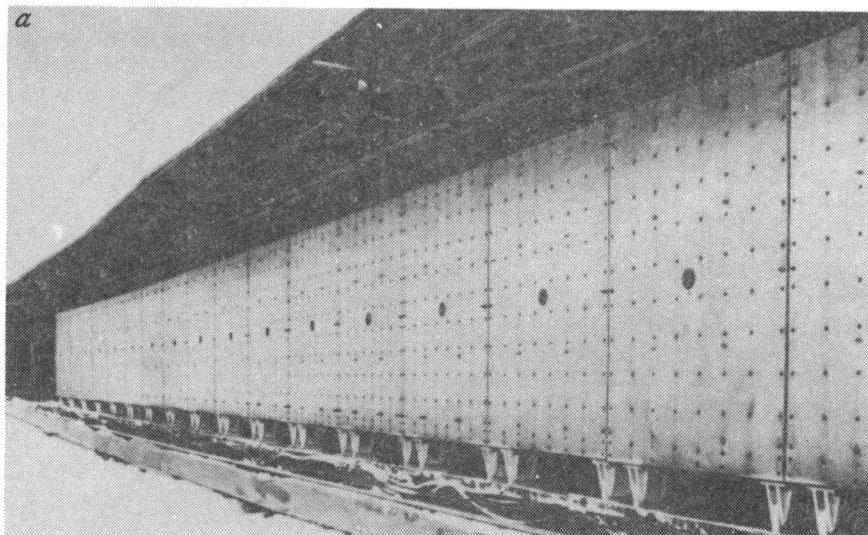


Рис. 1.15. Параболический (а) и плоский (б) рефлекторы радиотелескопа РТ-25×2 НИРФИ

системой Крауса, эффективно работающей в миллиметровом диапазоне волн вплоть до волны 1 мм):

Рабочий диапазон волн	0,8–4,5 мм
Геометрическая площадь параболического рефлектора	50,9 м ²
Шумовая температура системы (на волне 4 мм)	100 К

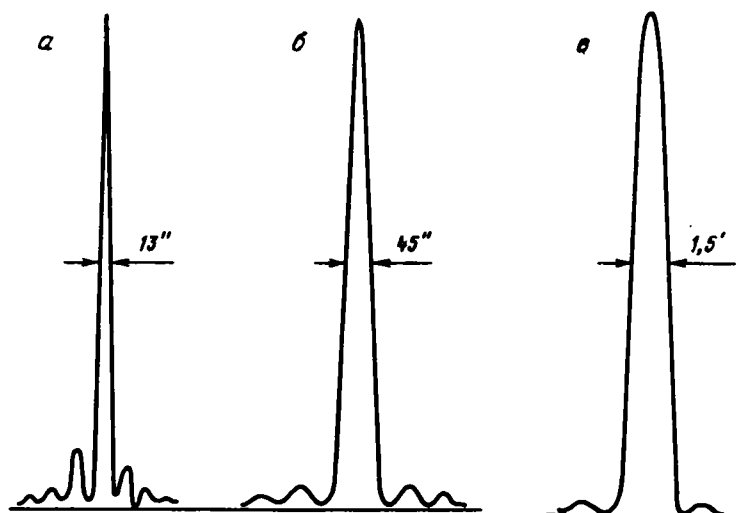


Рис. 1.16. Диаграммы направленности радиотелескопа РТ-25×2 НИРФИ
 а — $\lambda = 1,35$ мм; б — 4,1 мм; в — 8,6 мм

Сектор наблюдаемых склонений источников от -31 до 57°

Ошибки наведения

по азимуту $\pm 1,4''$
 по высоте $\pm 5''$

Параметры радиотелескопа РТ-25×2 на различных длинах волн:

Длина волны, мм	1,35	2,2	3,3	4,1	6,2	8,6
Эффективная площадь, м ²	15	18	29	38	26*	28*
Ширина диаграммы направленности						
по азимуту, угл. с.	13	20	28	45	60	90
по высоте, угл. мин	2,5	3,5	5	9	10,5	15

*При облучателях, рассчитанных для работы на более коротких волнах.

Антенна переменного профиля (АПП) при большой протяженности в горизонтальном направлении имеет вертикальную ножевую диаграмму направленности, как и пассажные радиотелескопы, но в отличие от последних источники с ее помощью могут наблюдаться в любом азимуте. Остановимся кратко на принципе работ антенны типа АПП, предложенном впервые С.Э. Хайкиным и Н.Л. Кайдановским в 1959 г. [8].

Для источников с достаточно высоким склонением, у которых позиционный угол вследствие вращения Земли меняется в широких пределах, последовательные наблюдения с вертикальной ножевой диаграммой направленности в различных азимутах эквивалентны измерениям с игольчатой диаграммой, имеющей раствор, определенный большим горизонтальным размером антенны [3, 4]. Это позволяет определить с высокой точностью обе координаты источника, а также получить двумерное рас-

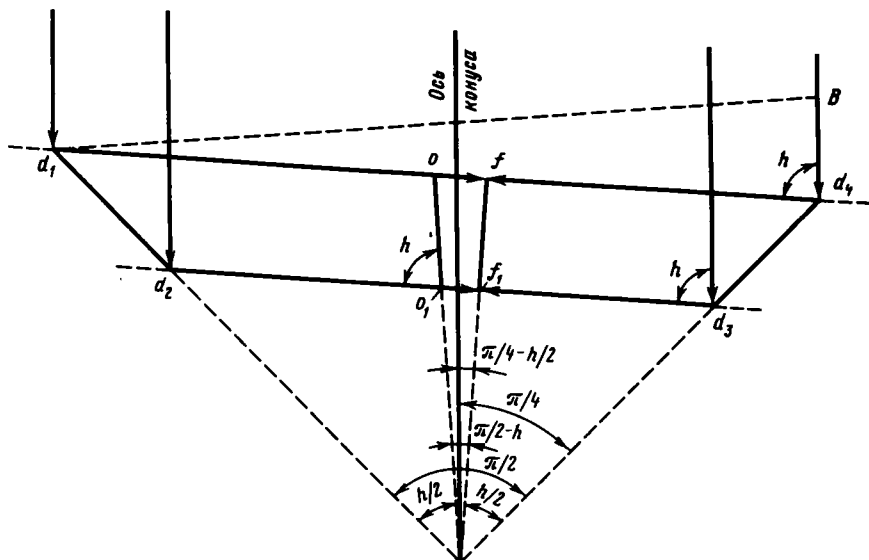


Рис. 1.17. Разрез отражающей поверхности АПП

d_1, d_2, d_3, d_4 — часть эллиптического конуса, заключенная между двумя горизонтальными плоскостями; $od_1 = od_4 = a$, $o_1d_2 = o_1d_3 = a_1$ — большие полуоси эллипсов в горизонтальных сечениях конуса; o и o_1 — центры эллипсов; f и f_1 — фокусы эллипсов в верхнем и нижнем сечениях; $of = c$; $o_1f_1 = c_1$; d_1B — линия фронта падающей волны; разность хода лучей (их условия синфазности сложения в фокусе): $dB = 2a \cosh h = d_1f - df = (a + c) - (a - c) = 2c$

пределение яркости протяженных источников путем их последовательного наблюдения в различных азимутах и, следовательно, при различных позиционных углах. Идея использовать вращение Земли для синтеза двумерной диаграммы направленности была разработана применительно к АПП независимо от позднее предложенного за рубежом метода суперсинтеза [8, 67].

Конфигурация отражающей поверхности АПП, а она должна изменяться в зависимости от высоты источника, представляет собой заключенную между двумя горизонтальными плоскостями часть эллиптического конуса с осью, наклоненной к вертикали на угол $\pi/4 - h/2$, где h — высота источника (рис. 1.17) [68].

Все эллипсы, образующиеся в горизонтальных сечениях конуса, имеют одинаковый эксцентриситет $e = c/a = c_1/a_1 = \cosh h$, где a — большая полуось эллипса, лежащая в плоскости, содержащей источник, а c — половина расстояния между фокусами. Центры эллипсов лежат на прямой oo_1 , проходящей через вершину конуса под углом $\pi/2 - h$ к вертикали. Фокусы эллипсов, в которых собираются в одинаковой фазе отраженные лучи, лежат на вертикали ff_1 , проходящей через вершину конуса.

Плоская волна после отражения от внутренней поверхности конуса преобразуется в цилиндрическую, сходящуюся на фокальной вертикали ff_1 , где должен быть расположен первичный вертикальный облучатель в виде линейной синфазной антенны. Вместо линейного облучателя можно исполь-

зовать любое вторичное зеркало, преобразующее цилиндрическую волну в сферическую, сходящуюся в фокусе, например рупор или диполь. Параболический цилиндр с горизонтальной образующей имеет существенное преимущество перед различными другими вторичными зеркалами, так как вдоль его фокальной прямой можно установить ряд первичных облучателей для нескольких диапазонов волн. С помощью этих облучателей можно вести почти одновременный прием радиоизлучения на различных волнах при прохождении источника и таким образом получать его спектр.

Остановимся подробнее на геометрии АПП. Расстояние от фокуса до точки эллипса в горизонтальных сечениях

$$\rho = P / (1 + \cos \varphi \cosh h), \quad (1.9)$$

где φ — угол между полуосью a и направлением на точку поверхности конуса из фокуса; параметр эллипса $P = b^2/a$, b — малая полуось. При $h = \pi/2$ $\rho = P = R$, т.е. равно радиусу окружности в горизонтальном сечении кругового конуса. При других высотах источника параметр $P < R$ и зависит от h . Переменную по форме отражающую поверхность АПП можно образовывать, расчленив ее на перемещаемые механизмами идентичные жесткие элементы, прилегающие к эллиптическому конусу с ошибкой, не превышающей $1/20$ длины волны принимаемого излучения. С этой целью элементам придается цилиндрическая форма с оптимальным радиусом кривизны в поперечном сечении $1,17R$. Кроме того, ограничиваются их линейные размеры [69].

Средние точки отражающих элементов могут быть расположены только внутри кольца шириной $R - r = \Delta R$, где ΔR — минимальное радиальное перемещение, допускаемое механизмами. Из конструктивных соображений ΔR стремятся сделать малым, так что $\Delta R/R = (3 \div 4) \cdot 10^{-3}$. При достаточно большой высоте h , когда эксцентриситет $e = \cosh h$ мал, весь эллипс можно разместить внутри кольца. По мере уменьшения высоты h и роста эксцентриситета эллипс начнет частично выходить за пределы кольца, что ведет к уменьшению геометрического коэффициента использования площади отражателя $N = l/2\pi R$, где l — периметр дуг эллипса, заключенных внутри кольца.

Возможны различные способы расположения частей эллипса внутри кольца при облучении из общего фокуса [70, 71]. Чаще всего используется расположение, при котором центр кольца смещен относительно центра эллипса в сторону его фокуса на величину Δ , а большая полуось $a = R + \Delta$. Эллипс касается внутренней окружности и затем пересекает внешнюю окружность (рис. 1.18). Для такого расположения эллипса его параметр

$$P = R [1 - \sqrt{1 - (r/R)^2 \cosh h}], \quad (1.10)$$

a — расстояние фокуса от центра

$$of = [R \cos h / (1 + \cosh h)] [1 + \sqrt{1 - (r/R)^2}]. \quad (1.11)$$

Этот способ позволяет использовать АПП на всех высотах источника h от 0 до $\pi/2$. Однако угловой раскрыв отражателя из центра круга будет уменьшаться от $\psi = 360^\circ$ при $h = \pi/2$ в зените до $\psi < 90^\circ$ при $h = 0$ на горизонте. Проекция эллипса на плоскость фронта падающей волны является окружностью с радиусом $P/\sinh h$.

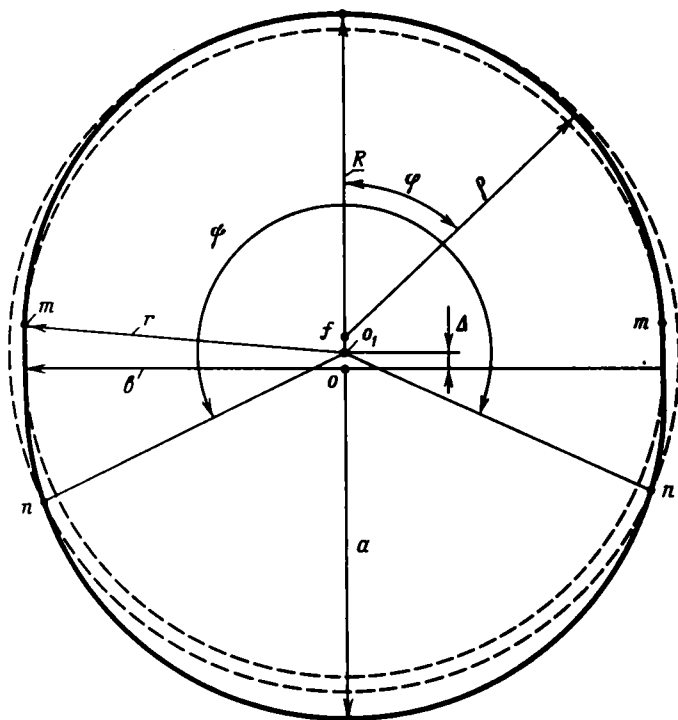


Рис. 1.18. Способ установки отражателя

n — точки пересечения внешней окружности эллипсом; m — точки касания эллипса с внутренней окружностью; o — центр эллипса; o_1 — центр окружностей; Δ — расстояние между центрами эллипса и окружностей

Диаграмма направленности АПП $2\theta_{0,5}$ при заданной длине волны λ , как обычно, определяется размерами раскрыва и условиями облучения. В вертикальной плоскости $2\theta_{0,5}$ определяется стрелкой дуги окружности в раскрыве d и вертикальным размером отражающего элемента H . При больших высотах источника $2\theta_{0,5} = \lambda/d$, а при малых h приближается к $2\theta_{0,5} = \lambda/H$. При постоянном угле облучения ширина вертикальной диаграммы в интервале углов $10 < h < 90^\circ$ может быть приближенно представлена как $2\theta_{0,5}(h) = 2\theta_{0,5}(\pi/2)/\sin h$. Диаграмма направленности в ортогональной плоскости, содержащей источник, определяется хордой l , стягивающей дугу в раскрыве [72]. В диаграмме направленности АПП имеются боковые лепестки с паразитной поляризацией. Величина этих лепестков растет с увеличением высоты h . Лепестки с паразитной поляризацией концентрируются к горизонтальному главному сечению диаграммы. Поле в паразитных лепестках АПП сдвинуто по фазе относительно основной поляризации на $\pi/2$. Поэтому в АПП паразитный сигнал в боковых лепестках эллиптически-поляризован. Наличие у диаграммы направленности АПП компоненты паразитной эллиптической поляризации приводит к уменьшению эффективной площади и создает трудности при исследовании поляризационных характеристик источников [73]. При ограничении

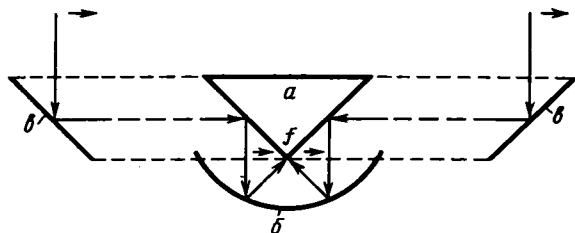


Рис. 1.19. Схема наблюдений в призенитной области с помощью устройства, состоящего из конуса и параболоида

a — круговой конус; $б$ — параболоид с фокусом f ; $ψ$ — главный круговой отражатель

отражающего сектора углом раскрытия $ψ < π/2$ потери эффективной площади АПП невелики [74]. Используя для наблюдения источника в данном азимуте сектор отражателя с $ψ < 90^\circ$, можно одновременно использовать другие секторы с $ψ < 90^\circ$ со своими вторичными зеркалами для наблюдения источников в других направлениях. При увеличении источника и углового раскрытия $ψ$ эффективная площадь АПП будет падать.

Для приема из области зенита можно использовать весь кольцевой отражатель, если расположить в центре АПП приемное устройство с поляризацией, зависящей от азимута. В качестве такого устройства могут служить четыре вторичных зеркала с диаграммами направленности (в азимутальном направлении) шириной $90-100^\circ$ и поляризацией первичных облучателей, которая отличается от поляризации у соседнего зеркала на 90° . Все четыре первичных облучателя должны быть соединены фидером с общим радиометром. Для той же цели приема излучения от источника, расположенного в области зенита, с помощью всей кольцевой апертуры может служить устройство, состоящее из кругового конуса с вертикальной осью и углом при вершине 90° и горизонтального параболического зеркала с первичным облучателем в его фокусе [75], (рис. 1.19).

Такое устройство преобразует образованную АПП цилиндрическую волну сначала с помощью центрального конуса в плоскую, а затем после отражения от параболического зеркала — в сферическую, сходящуюся в первичном облучателе. При этом центральный конус преобразует поляризацию падающей на него волны после отражения так, что компенсирует поляризацию, созданную основной отражающей поверхностью АПП. В этом случае паразитная поляризация в антенне может быть обусловлена только возможной линейной кросс-поляризацией параболического зеркала. Приемное устройство с конусом и параболоидом можно использовать не только в призенитной области, но и при любой высоте источника h , если применить специальный первичный облучатель, способный облучить сектор параболоида с углом, соответствующим угловому раскрытию главного отражателя $ψ$ [71].

Коэффициент использования площади АПП, помимо обычных факторов, зависит также от: а) угла наклона отражающих элементов, б) площади щелей между отражающими элементами, в) периодической ошибки аппроксимации конической поверхности цилиндрическими отражающими

элементами, г) уровня паразитной эллиптической поляризации. Перечисленные источники ошибок не вносят значительных потерь, так что КИП АПП незначительно отличается от КИП антенн со сплошной поверхностью той же величины [74].

При наблюдении вблизи зенита, например с помощью устройства с конусом и параболоидом, когда используется вся поверхность главного отражателя, эффективная площадь может возрасти в несколько раз по сравнению с облучением одного сектора не только за счет увеличения геометрической площади, но и вследствие равномерного облучения отражающей поверхности в горизонтальном направлении. Избыточные шумы АПП при оптимизации облучения и экранировке от излучения Земли и местных предметов под и над отражателем не отличаются от шумов обычных зеркальных антенн того же диапазона [76]. АПП меньше подвержена пространственным флуктуациям шумов, обусловленных изменением числа слабых распределенных по небу радиоисточников, попадающих в диаграмму направленности при ее перемещении по небу (см. ниже). Уменьшение влияния пространственных флуктуаций при наблюдениях на АПП связано с их избыточным разрешением [4]:

$$\eta = \frac{\lambda^2}{A_{\text{эф}} \Omega_{\text{синт}}} \gg 1,$$

где телесный угол синтезированной диаграммы направленности $\Omega_{\text{синт}} \ll \ll \lambda^2/A_{\text{эф}}$ [77]. На АПП возможно осуществлять наблюдения не только в режиме прохождения источника через неподвижную диаграмму направленности, но и в режиме сопровождения.

Кратковременное сопровождение в течение нескольких минут в азимутальном направлении проводится (без существенной аберрации) за счет перемещения первичного облучателя вдоль фокальной линии вторичного зеркала — параболического цилиндра. Сопровождение по высоте достигается изменением радиального расстояния от вторичного зеркала до центра [78].

Длительное сопровождение при максимальной апертуре главного отражателя требует, чтобы отражающие элементы и вторичное зеркало автоматически устанавливались в соответствии с координатами источника. При этом необходимо обеспечивать перемещение вторичного зеркала как по азимуту, так и в радиальном направлении [79]. На АПП возможен технически более простой способ сопровождения источника в течение десятков минут и часов ценой потери 10–20% площади апертуры главного отражателя [80].

Этот способ основан на том, что в некотором интервале высот источника Δh расстояние вторичного зеркала от центра может оставаться неизменным, если при этом незначительно изменять параметр эллипса, на котором расположены центры отражающих элементов, и положение его вершин относительно большей окружности с радиусом R [81]. Сопровождение источника в интервале изменения его высот Δh достигается автоматической установкой отражающих элементов на эллипсе с переменными параметром и положением его вершины, определяемыми высотой источника h , а также вращением оси эллипса и движением вторичного зеркала по круговым путям в соответствии с изменением азимута источника. При

нескольких круговых путях и условия возможности перехода вторичного зеркала с одного кругового пути на другой сопровождение источника может продолжаться в течение нескольких часов в сутки [80]. Этот упрощенный способ сопровождения позволяет также получать двумерное распределение яркости источника за счет изменения его позиционного угла.

На АПП можно применить также метод сопровождения источников с помощью неподвижного вторичного зеркала, установленного в центре кольца или вблизи него. Рабочий сектор отражателя имеет при этом сильно укороченную ширину l по сравнению со случаем оптимального расстояния зеркала от центра, когда $l \ll L$. Сопровождение или многократное повторение наблюдений источника достигается перемещением укороченного сектора отражателя по кольцу в пределах неподвижной диаграммы направленности вторичного зеркала ($110-120^\circ$) за счет того, что в рабочий сектор отражателя последовательно включаются новые "головные" и исключаются "хвостовые" отражающие элементы. Этот метод получил название метода эстафеты [82]. Метод эстафеты позволяет сопровождать источник в течение 10–15 ч. За время сопровождения позиционный угол источника сильно изменяется, что позволяет получить двумерную картину распределения яркости источника. Эффективная площадь АПП при этом методе падает как за счет уменьшения апертуры, так и за счет переоблучения рабочего отражающего сектора приблизительно пропорционально $(l/L)^2$, а разрешающая сила уменьшается в L/l раз. Этот метод целесообразно применять при исследовании мощных протяженных и быстропеременных источников, например Солнца.

Сохранить эффективную площадь и разрешающую силу АПП при облучателе, находящемся в центре, возможно, если периферийные отражающие элементы, которые требуют радиального перемещения, превышающего допустимое ΔR , устанавливать с "зонированием" так, чтобы отраженное ими поле было смещено по фазе на число, кратное 2π (разность хода в целое число длин волн) [83]. Это влечет за собой некоторое сокращение полосы частот принимаемого излучения и, следовательно, уменьшение чувствительности радиотелескопа по потоку.

Метод "зонирования" целесообразно применять при спектральных наблюдениях с узкой полосой частот. Режим сопровождения, а также последовательное наблюдение "на проходе" требуют автоматизированного управления отражающими элементами и вращения находящегося в центре вторичного зеркала.

Если радиотелескоп типа АПП дополнительно снабжен плоским перископическим отражателем южного сектора, то с его помощью можно сопровождать источник при использовании полной апертуры главного отражателя — параболического цилиндра с вертикальной образующей. В режиме сопровождения перископический отражатель наклоняется в соответствии с высотой h источника, ось главного отражателя устанавливается в направлении отраженного перископом пучка, а вторичное зеркало движется по круговому пути, оставаясь в фокусе главного отражателя — сектора АПП. Длительность сопровождения зависит от склонения источника и максимально возможного угла наклона перископа. Она может меняться от нескольких минут при кульминации источника вблизи горизонта до 24 ч при достаточно большом склонении [84].

Выше были изложены основные принципы работы радиотелескопа с расчлененной отражающей поверхностью, составленной из элементов так, что ее форма изменяется в процессе наблюдения (АПП). Эти принципы были предложены, разработаны и реализованы советскими учеными [8, 67], что позволило создать такие уникальные инструменты для отечественной радиоастрономии, как Большой пулковский радиотелескоп (БПР) и РАТАН-600. Ниже будут рассмотрены подробнее эти инструменты.

Большой пулковский радиотелескоп [4, 68, 69, 72–74, 85].

Этот инструмент, построенный в 1956 г., был предшественником РАТАН-600 и может рассматриваться как его рабочий экспериментальный макет. На нем был испытан принцип и конструкция, разработаны различные методы юстировки и антенных измерений [86–88]. Отражающая поверхность БПР состоит из 90 одинаковых отражающих элементов, выгнутых по цилиндру большого радиуса. Размеры элементов составляют $3 \times 1,5$ м, и они расположены по окружности радиуса $R = 100$ м. Отражающие элементы БПР управляются вручную с помощью механизмов по радиальному положению, наклону и азимутальному повороту.

БПР используется в диапазоне длин волн от 0,8 до 30 см. На длине волны 0,8 см ширина диаграммы направленности в горизонтальном сечении равна $15''$ при уровне боковых лепестков менее 10 дБ и рассеянном фоне порядка 23 дБ. Коэффициент использования площади БПР, измеренный по наземному генератору, составляет 0,47 на длине волны 0,8 см и несколько выше на более длинных волнах. На БПР начиная с 1956 г. выполнено большое число исследований по основным направлениям радиоастрономии.

Радиотелескоп РАТАН-600 САО АН СССР расположен в станице Зеленчукской Ставропольского края [4, 5, 9, 70, 71, 76, 80, 84, 89–93]. Строительство радиотелескопа началось в 1968 г. Первая очередь (северный сектор) была завершена в 1974 г. Полностью радиотелескоп был закончен в 1976 г. Общий вид РАТАН-600 показан на рис. 1.20.

Антенна радиотелескопа представляет собой замкнутый круговой отражатель, составленный из элементов и позволяющий проводить наблюдения в различных азимутах, а также расположенный против южного сектора расчлененный на элементы плоский перископический отражатель [91, 92]. Он используется главным образом для быстрого обзора неба, но может служить также для длительного сопровождения источников. Радиус средней окружности, на которой расположены середины всех отражающих элементов, составляет 288 м. Поперечный размер отражающих элементов равен 1,94 м при их высоте 7,4 м (этот размер, возможно, будет увеличен до 11,2 м). Предварительное радиальное перемещение элемента $\pm 0,5$ м, максимальный наклон от вертикали 53° и поворот по азимуту $\pm 6^\circ$. Перископический отражатель состоит из 124 плоских элементов шириной 3,1 м и высотой 8,5 м. Максимальный угол их наклона равен 70° . Все эти отражающие элементы содержат трубчатые сварные фермы, на которых укреплены отражающие панели из листового алюминия. Листы отражающих поверхностей устанавливаются на ступе с помощью отжимающих пружин и регулирующих винтов и корректируют с использованием геодезических методов. Погрешность поверхности отражающих элементов 0,1–0,2 мм. Механизмы кругового отражателя установлены на железобетонном фундаменте.

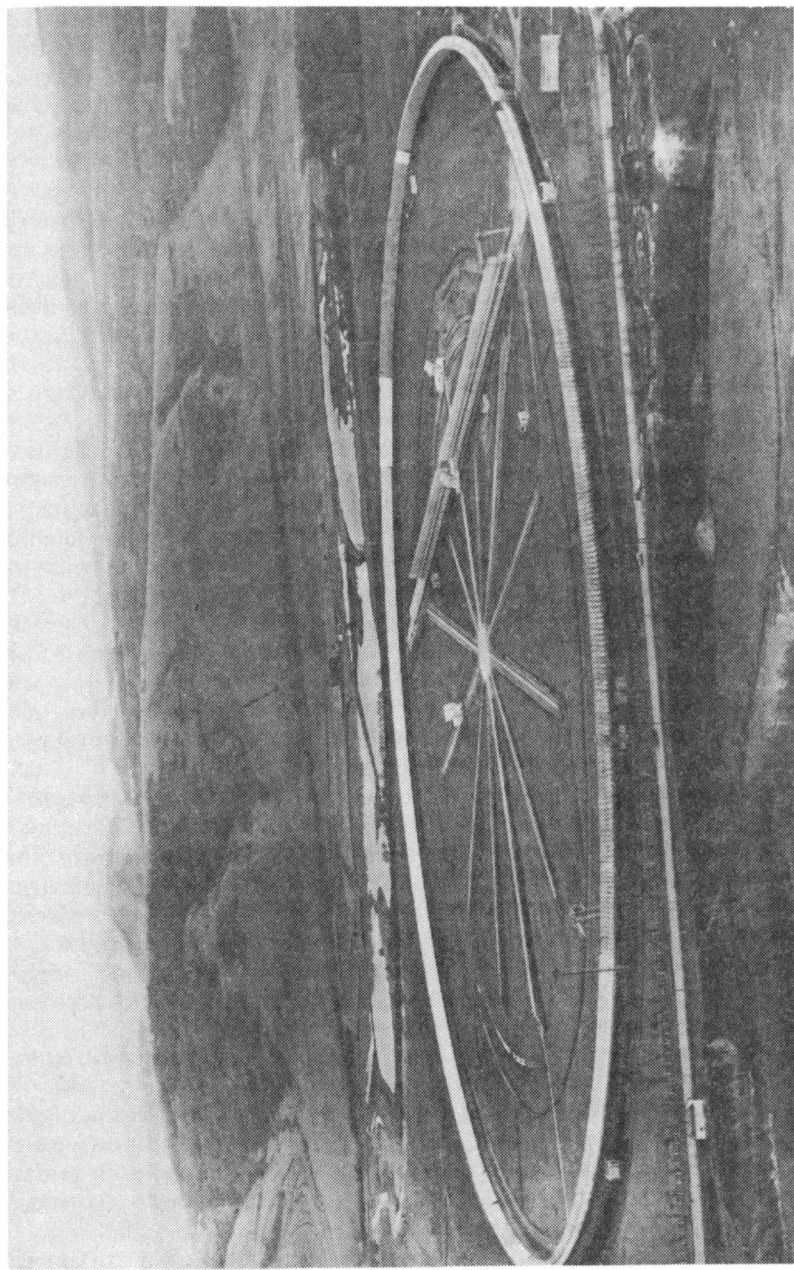


Рис. 1.20. Радиотелескоп РАТАН-600

Видны круговой и плоский отражатели, вторичные зеркала на радиальных и круговых рельсовых путях, поворотный круг в центре

Элементы плоского перископического отражателя смонтированы на ферменных стойках, которые можно укладывать на землю, когда южный сектор кругового отражателя используется в режиме АПП при наблюдениях источников северной или зенитной областей небесной сферы. Все механизмы отражающих элементов унифицированы, снабжены электрическими приводами и отсчетно-установочными устройствами, позволяющими управлять отражающими элементами как в полуавтоматическом режиме при ручной установке по таблицам, так и автоматически от ЭВМ [90].

Для одновременного наблюдения в двух различных азимутах на круговом отражателе и для наблюдений с помощью перископического отражателя служат три вторичных зеркала в виде несимметричных параболических цилиндров с фокусным расстоянием 2,15 м, высотой 5,5 м и шириной 8,2 м (рис. 1.21). Первичные облучатели-рупоры и высокочастотная аппаратура смонтированы на каретке, которая может перемещаться вдоль фокальной прямой параболического цилиндра в пределах $\pm 0,75$ м. На каретке могут быть установлены до восьми первичных облучателей в диапазоне длин волн от 0,8 до 30 см.

Каретка снабжена приводом и отсчетно-установочным устройством, позволяющим автоматически следить за источником в течение нескольких минут. Вторичные зеркала установлены на трехопорных самоходных тележках, снабженных домкратами и измерительными устройствами для их горизонтирования. С ними жестко соединены кабины приемной аппаратуры площадью около 40 м² на четырехопорных тележках (см. рис. 1.21).

Размеры модернизируемых вторичных зеркал, возможно, будут увеличены: высота до 6,8 м, ширина до 12 м и фокусное расстояние до 2,5 м. Для перемещения вторичных зеркал с кабинами в радиальных направлениях служат 12 трехрельсовых путей (через 30° по азимуту, см. рис. 1.20). Перевод вторичных зеркал с одних путей на другие осуществляется с помощью центрального поворотного круга.

Вторичное зеркало южного сектора, работающее с перископическим отражателем, расположено на круговых двухрельсовых путях. На радиотелескопе РАТАН-600 применялось длительное сопровождение источников с помощью перископического отражателя при использовании полной апертуры главного отражателя — параболического цилиндра с вертикальными образующими, а также метод эстафеты [82] при положении вторичного зеркала вблизи центра круга с укороченной апертурой главного отражателя. При методе эстафеты с зонированием использовался полный раскрыв главного отражателя, но при полосе частот, суженной до 2–10 МГц. Этот метод эффективно применялся при многократных наблюдениях источников W49, Лебедь А, Солнца и др. [83].

Для наблюдений области вблизи зенита служит устройство с круговым конусом и параболоидом (рис. 1.22). Как уже упоминалось, его можно использовать при любой высоте источника при условии применения специализированного первичного облучателя с углом облучения параболоида, соответствующим апертуре главного отражателя.

Для обеспечения высокой точности и отражающей поверхности антенн с рассчитанной апертурой применялись инженерно-геодезические, радиотехнические методы юстировки [93–96].

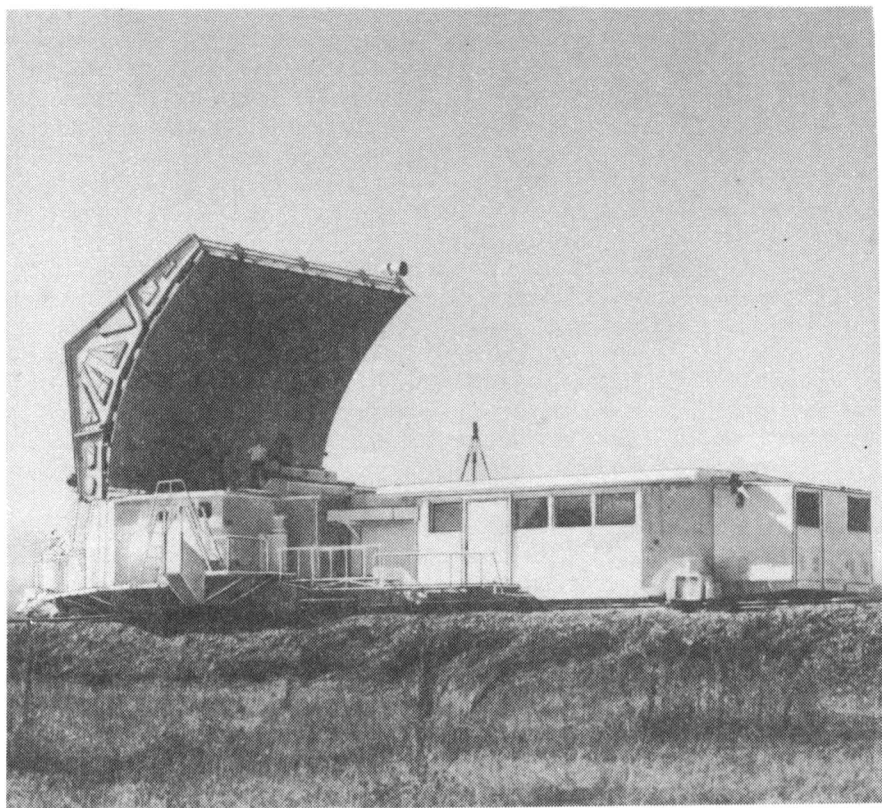


Рис. 1.21. Вторичное зеркало с кабиной для приемной аппаратуры на радиальных рельсовых путях

Инженерно-геодезические методы служили для предварительной установки отражающих элементов и введения поправок к значениям шкал [93]. Радиотехнические методы (автоколлимационный и голографический) предназначены для точной установки отражающих элементов в исходных положениях на круговом цилиндре с вертикальной образующей, для точной калибровки шкал отсчетно-установочных устройств и для контроля формы диаграммы направленности радиотелескопа. При методе автоколлимации использовался приемнопередаточный рупор штатного облучателя, установленного в центре кругового цилиндра, на котором должны быть установлены отражающие элементы.

Излучаемый высокочастотный импульс после отражения от двух отражающих элементов (устанавливаемого и опорного), образующих интерферометр, позволял по максимуму принимаемого сигнала поочередно устанавливать каждый отражающий элемент на окружности с радиусом опорного элемента. Таким образом определялись нуль-пункты радиальных шкал отражающих элементов с погрешностью 0,07 мм. Угломерные шкалы проверялись методом равносигнальной зоны. Качество отражающей поверхности можно проконтролировать путем поперечного перемещения

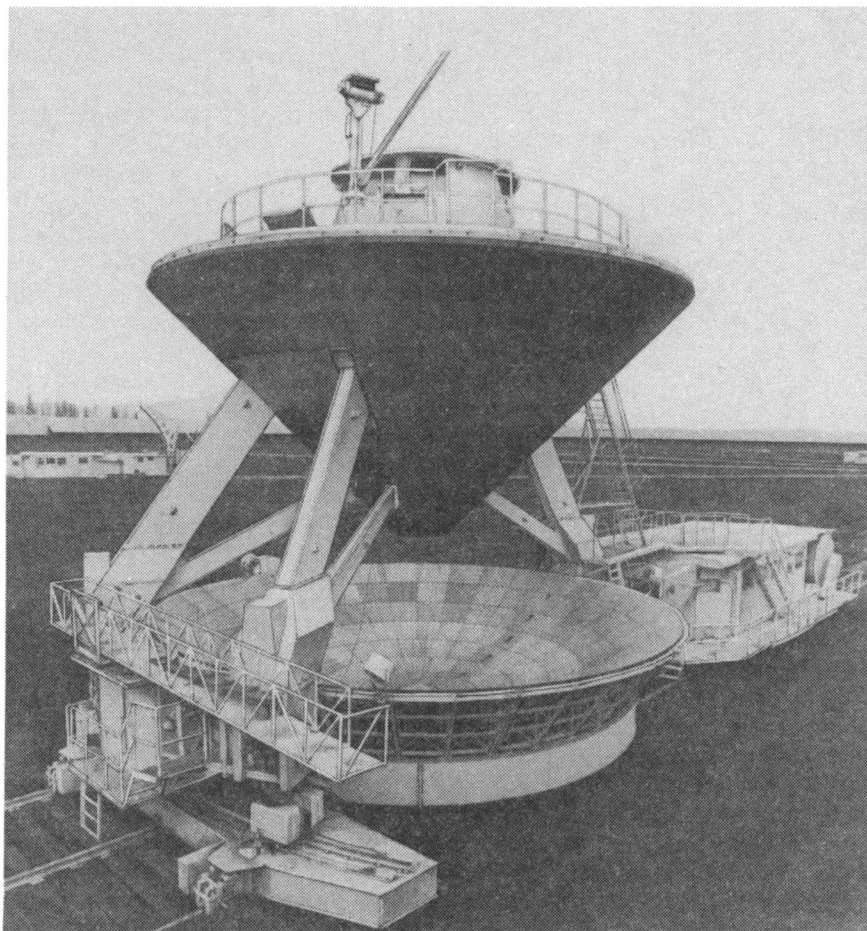


Рис. 1.22. Устройство с конусом и параболидом для наблюдений в призенитной области

рупора с целью измерения распределения мощности в фокальном пятне, которое соответствует горизонтальной диаграмме направленности антенны [94]. Автоколлимационный метод обеспечивает высокую точность юстировки антенны, но требует значительного времени — порядка суток.

По мере укорочения длины волны наблюдений и ужесточения требований к точности антенны появилась необходимость в быстром методе контроля качества отражающей поверхности и оперативном исправлении обнаруженных ошибок в установке отражающих элементов. Для этой цели применяется голографический метод, позволяющий быстро определить амплитудно-фазовое распределение поля на апертуре антенны по измеренному комплексному распределению поля в компактной области вблизи фокуса. Такие измерения проводятся путем поперечного смещения автоколлимационной системы с двумя пространственно разнесенными рупо-

рами (излучающим и приемным). В качестве опорного сигнала с постоянной амплитудой и фазой в приемном рупоре служит часть мощности передающего рупора, ответвленная в него через фазовращатель. Для получения $\sin$ - и $\cos$ -интерферограмм поперечное смещение облучателей производят дважды при фазе 0 и $\pi/2$. Зная $\sin$ - и $\cos$ -распределения поля на фокальной плоскости, можно путем преобразования Фурье получить фазовое распределение поля по апертуре, характеризующее качество отражающей поверхности, и оперативно внести исправление в расположение отражающих элементов [95].

Описанные точные радиотехнические методы юстировки могут быть применены только при вертикальном положении отражающих элементов. При установке антенны для наблюдений источников над горизонтом отражающие элементы необходимо смещать по радиусу, наклонять и поворачивать по азимуту. Вследствие этого достигнутая при юстировке высокая точность поверхности ухудшается из-за деформации конструкций и кинематических ошибок механизмов. Поэтому был разработан радиоастрономический метод юстировки по источникам излучений, близким по склонению к источнику, подлежащему наблюдению [96]. Такими могут быть Солнце, Луна и некоторые дискретные источники. При радиоастрономической юстировке отражающих элементов по угловым координатам осуществляется прием радиоизлучения, отраженного отдельным элементом при двух его положениях $\alpha_0 \pm \Delta\alpha$ по обе стороны от расчетного значения α_0 , соответствующего направлению на источник в момент измерения. По измеренным значениям амплитуд сигнала вычисляется координата, соответствующая максимуму сигнала $\alpha_{\max}$, и поправка к шкале $\alpha_{\max} - \alpha_0$.

Для юстировки отражающих элементов по радиальной координате прием радиоизлучения от источника ведется на два соседних элемента (опорный и устанавливаемый), образующих интерферометр. Измерение амплитуды сигнала ведется при двух радиальных положениях юстируемого отражающего элемента $l_0 \pm \Delta l$ по обе стороны от значения координаты опорного l_0 . По измеренным амплитудам сигналов вычисляется $l_{\max}$ — радиальная координата, соответствующая синфазному сложению сигналов, и находится поправка $l_{\max} - l_0$. Отыюстированный отражающий элемент далее используется как опорный для юстировки соседнего. Радиоастрономическая юстировка требует значительного времени — порядка нескольких минут на одну координату каждого отражающего элемента. С помощью описанных методов юстировки среднеквадратичная погрешность отражающей поверхности РАТАН-600 была доведена до 0,2–0,3 мм. Такая точность поверхности обеспечивает на длине волны 1 см достаточно высокий КИП при ширине диаграммы направленности 5", а вблизи зенита — 3".

Технические данные РАТАН-600 при угле облучения по горизонтали 110° представлены в табл. 1.5 ($A_{\text{эф}}$ измерена по дискретным источникам).

При наладке РАТАН-600 радиотехническим способом с применением методов автоколлимации получена удовлетворительная диаграмма направленности даже на длине волны 0,4 см. Шумовая температура антенны РАТАН-600 (помимо шумов неба, попадающих в главный лепесток) определяется главным образом рассеянным излучением Земли, попадающим в облучатель за счет переоблучения отражающих элементов по высоте и через щели между ними.

Таблица 1.5

λ , см	$A_{\text{эф}}, \text{м}^2$			$\bar{A}_{\text{эф}}, \text{м}^2$	K
	ЗС 44	ЗС 84	ЗС 86		
1,35	580	720	680	660	0,35
2,08	1010	720	970	900	0,5
3,90	12,60	990	950	1060	0,57
8,20	1000	750	840	860	0,47
13,00	—	700	1000	850	0,46

Шумовую температуру антенны удалось снизить до 11,5 К, из которых 5,5 К складываются за счет шумов "реликтового" фона (2,7 К) и атмосферы (2,8 К) (значения приведены для угла места 51°) и длины волны (7,6 см). Чтобы достичь такого значения, оптимизировали закон облучения рефлектора, установили металлическую сетку, экранирующую фундаменты и землю под отражателем и закрыли щели между отражающими элементами. Таким образом, у РАТАН-600 температура избыточных шумов не превышает 6 К, как и у лучших рупоно-параболических систем [76].

Низкая температура антенны сделала целесообразным применение на входе радиометра параметрических усилителей, охлажденных до гелиевых температур. Для уменьшения шумов от модуляторов в тракте пришлось отказаться от метода модуляции и применить нулевой метод с шумовым пилот-сигналом [97]. Низкая шумовая температура антенны и радиометра позволила получить чувствительность $T = 2,5 \cdot 10^{-3}$ К при постоянной времени $\tau = 1$ с и по потоку $S = 0,6 \cdot 10^{-3}$ Ян при $\tau = 120$ с.

Радиотелескоп РАТАН-600 является общесоюзным инструментом. На нем ведут наблюдения радиоастрономы многих обсерваторий Советского Союза по разнообразным программам.

1.3. Многоэлементные радиотелескопы с незаполненной апертурой

В предыдущем разделе были рассмотрены антенны переменного профиля, у которых форма апертуры и соответственно характеристики направленности изменяются в зависимости от направления приема. При работе около зенита их диаграмма направленности по форме близка к "карандашной", а в направлении на горизонт переходит в "ножевую". Разрешающая способность такого инструмента, очевидно, определяется его максимальным базовым размером (в случае кольцевой конфигурации, как у РАТАН-600, — ее диаметром).

В радиоастрономии прогресс в исследованиях зависит от возможностей обеспечить высокое угловое разрешение радиотелескопов. Применение радиоинтерферометрических методов, как известно (см., например, [3]), позволило получить высокую разрешающую силу, хотя многоэлементная форма интерференционной диаграммы приема и создавала определенные трудности в наблюдениях.

Прежде чем описывать отечественные радиотелескопы с незаполненной

апертурой, кратко остановимся на общих теоретических соотношениях. Как отмечено во введении, развитие интерферометрии как направления в радиоастрономии привело к разработке и созданию нового класса радиотелескопов с незаполненной апертурой, работающих в режиме синтеза антенного раскрыва (апертуры). Действительно, двухантенный интерферометр, базовое расстояние между элементами которого можно менять по размеру и по направлению в пространстве (интерферометр с переменным вектором базы), дает набор элементов раскрыва большой антенны с последовательным перебором различных комбинаций входящих в нее элементов (участков раскрыва) [3–5].

Как известно [3], сигнал на выходе корреляционного интерферометра (после перемножения и усреднения напряжений от двух антенн) равен

$$V_c(t) = \overline{V_1(t) V_2(t)}. \quad (1.12)$$

где черта сверху означает усреднение во времени. В результате, как показано в [3], отклик такого интерферометра на точечный источник радиоизлучения с плотностью потока S

$$P = \frac{1}{2} S [2(A_{1\max} A_{2\max})^{1/2} |F_1(l, m) F_2(l, m)| \cos 2\pi(ul + vm)] . \quad (1.13)$$

Здесь $A_{1\max}$, $A_{2\max}$ — эффективные площади 1-й и 2-й антенн; $F_1(l, m)$, $F_2(l, m)$ — диаграммы направленности этих антенн по полю; u, v — составляющие вектора базы интерферометра по осям x и y (в длинах волн); l, m — направляющие косинусы точки наблюдения на сфере единичного радиуса. Сомножитель в квадратных скобках — диаграмма направленности интерференционной системы:

$$A_c(l, m) = 2(A_1 A_2)^{1/2} F_1 F_2 \cos \psi, \quad (1.14)$$

которую иногда называют диаграммой направленности по "косинусному" выходу. Если перед перемножением сигналов в корреляторе в один из антенных каналов ввести фазовый сдвиг $\pi/2$ (например, включив дополнительно в тракты одной из антенн отрезок линии $\lambda/4$), то на выходе такого коррелятора получится отклик по "синусному" выходу:

$$A_s(l, m) = 2(A_1 A_2)^{1/2} F_1 F_2 \sin \psi. \quad (1.15)$$

В этих последних двух выражениях аргументом является

$$\psi = 2\pi(ul + vm). \quad (1.16)$$

Легко показать [3], что при достаточно "широких" диаграммах направленности антенн интерферометра $F_1(l, m)$ и $F_2(l, m)$ его отклики по синусному и косинусному выходам для протяженного источника с распределением яркости $T_{\text{я}}(l, m)$ позволяют получить амплитуду и фазу фурье-гармоники спектра $T_{\text{я}}(u, v)$, связанного преобразованием Фурье с распределением яркости $T_{\text{я}}(l, m)$ источника. Передвигая одну антенну относительно другой, изменяя тем самым u, v в пределах контура апертуры заданного размера, получим комбинацию отсчетов с $A_c(u, v)$, $A_s(u, v)$ от интерферометров на плоскости u, v . Очевидно, что предельные $u_{\max}$, $v_{\max}$ определяют (в первом приближении) разрешающую способность синтезированной таким способом апертуры. В современных системах

апертурного синтеза применяются несколько антенных элементов, расположенных таким образом, чтобы комбинации из них по два (двухантенные интерферометры) достаточно равномерно заполняли бы плоскость u, v . При наблюдениях источников радиоизлучения с протяженным распределением яркости $T_{\text{я}}(l, m)$ за 12 ч, когда антенные элементы следят за источником, заполнение плоскости u, v даже для стационарно установленных антенн получается достаточно хорошим, так как из-за вращения Земли проекции входящих в систему баз на картинную плоскость непрерывно меняются, а траектория базы на плоскости u, v для одной пары антенн в общем случае выглядит как часть эллипса. Иногда такие системы апертурного синтеза называют системами суперсинтеза с использованием вращения Земли. Система с передвижными антеннами и система с использованием вращения Земли являются системами последовательного апертурного синтеза. Первая из них была создана М. Райлом (Англия), вторая впервые была использована У. Христиансенем (Австралия) [3]. Очевидно, что систему с последовательным синтезом апертуры можно использовать в наблюдениях объектов, характеристики которых неизменны за достаточный для синтеза отрезок времени.

В отличие от них системы параллельного апертурного синтеза позволяют формировать сразу диаграмму направленности (по мощности) с узким главным лепестком, что необходимо при наблюдениях объектов, параметры которых изменяются во времени. Действительно, из (1.13) видно, что у двухантенного корреляционного радиоинтерферометра его диаграмма направленности является произведением диаграмм антенн (по полю) и сомножителя вида $\cos$ или $\sin$ с аргументом, определяемым базой между фазовыми центрами антенн, входящих в корреляционный инструмент.

В крестообразном радиотелескопе, схема которого впервые была предложена Б. Миллсом [3], две антенны, вытянутые в ортогональных направлениях пересекаются в центре под прямым углом. Очевидно, что при этом их фазовые центры совпадают и аргумент в (1.13)

$$\psi = 2\pi(ul + vm) = 0. \quad (1.17)$$

Отсюда если в плечах "креста" использованы антенны длиной L и шириной B (в длинах волн), расположенные одна с севера на юг, а другая с запада на восток, то при равномерном распределении поля по их раскрытию легко получить диаграмму направленности крестообразного радиотелескопа (по мощности) в виде

$$A(l, m) \equiv A_c(l, m) = \left| A_{\max} \right| \frac{\sin \pi L l}{\pi L l} \frac{\sin \pi L m}{\pi L m} \frac{\sin \pi B m}{\pi B m} \frac{\sin \pi B l}{\pi B l}. \quad (1.18)$$

Здесь $|A_{\max}| = 2(A_{1\max} A_{2\max})^{1/2}$ — эффективная площадь в направлении главного максимума как удвоенное среднегеометрическое значение от эффективных площадей составляющих антенн $A_{1\max}$ и $A_{2\max}$; l, m — направляющие косинусы, которые можно определить через угол места h и азимут Az , измеренный относительно направления на юг, из соотношений

$$l = \cosh \sin Az, \quad m = \cosh \cos Az. \quad (1.19)$$

Из (1.18) видно, что диаграмма направленности крестообразного телескопа имеет карандашную форму главного лепестка диаграммы направленности

(строго говоря, в пространстве косинусов l, m), когда каждая антенна телескопа имеет ножевидную форму диаграммы направленности. Таким образом, в корреляционном телескопе по крестообразной схеме удалось получить диаграмму по мощности, по виду близкую к диаграмме по полю для круглого раскрыва диаметром L , не заполняя его целиком антенными элементами. При равномерном распределении поля по антеннам крестообразного телескопа получают боковые лепестки довольно высокого уровня, которые удастся уменьшить, создавая распределение поля по антенне, уменьшающееся по амплитуде к ее краям.

Легко показать, что если в крестообразном телескопе не использовать одну половину какой-нибудь из антенн и перейти таким образом к Т-образной схеме, то из-за смещения фазового центра этой антенны из центра "креста" $\psi \neq 0$, и если, например, плечи Т-образного инструмента расположены так, что плечо длиной L установлено с запада на восток, а другое длиной $L/2$ — от центра к югу, то диаграмма направленности такого Т-образного радиотелескопа описывается следующим выражением по косинусному и синусному выходам (сомножители, определяемые конечной шириной антенны B , опущены):

$$A_c(l, m) = \left| A_{\max} \right| \frac{\sin \pi L l}{\pi L l} \frac{\sin \pi L m / 2}{\pi L m / 2} \cos \frac{\pi L m}{2},$$

$$A_s(l, m) = \left| A_{\max} \right| \frac{\sin \pi L l}{\pi L l} \frac{\sin \pi L m / 2}{\pi L m / 2} \sin \frac{\pi L m}{2},$$

или

$$\begin{aligned} A_c(l, m) &= \left| A_{\max} \right| \frac{\sin \pi L l}{\pi L l} \frac{\sin \pi L m}{\pi L m}, \\ A_s(l, m) &= \left| A_{\max} \right| \frac{\sin \pi L l}{\pi L l} \frac{\sin^2 \pi L m / 2}{\pi L m / 2}. \end{aligned} \quad (1.20)$$

Из (1.20) видно, что "косинусная" диаграмма направленности Т-образного инструмента совпадает с диаграммой крестообразного радиотелескопа, но появился отличный от нуля отклик на "синусном" выходе инструмента. Следует заметить, что уровень боковых лепестков в одном из направлений понизить не удастся обычным способом (по m для рассматриваемого случая) и что эффективная площадь Т-системы меньше в $\sqrt{2}$ раз по сравнению с крестообразной при прочих равных параметрах, так как одна из антенн уменьшена в 2 раза по длине.

Главная особенность рассмотренных систем последовательного и параллельного апертурного синтеза заключается в том, что при небольшой собирающей площади антенных систем A и частичном заполнении апертуры в пределах квадрата со стороной L в первом приближении формируется диаграмма направленности как у непрерывно заполненного раскрыва максимального размера L , т.е. телесный угол главного лепестка диаграммы направленности $\Omega \ll \lambda^2/A$, в то время как для обычных антенн с заполненной апертурой, как правило, $\Omega \geq \lambda^2/A$ и высокое угловое разрешение достигается в антеннах увеличением площади A . "Избыточное разрешение"

[4] стало возможным обеспечить только с помощью радиотелескопов с незаполненной апертурой, что необходимо для ряда наблюдательных программ в радиоастрономии. В частности, когда плотность распределения дискретных источников по небу высокая и потоки их радиоизлучения большие, то прежде всего необходимо добиться узкой диаграммы направленности радиотелескопа, чтобы разрешить радиоисточники друг от друга хотя бы с невысокой чувствительностью (эффективной площадью) радиотелескопа.

Так, каталоги первых обзоров дискретных источников не совпадали вследствие появившихся из-за эффекта "путаницы"³ ложных источников. Суть его состоит в том, что в диаграмму направленности радиотелескопа при обзоре неба вместе с исследуемым радиоисточником попадает большое число слабых неразрешенных источников, образующих на небе дискретный фон. Очевидно, что число таких источников случайно. Как установлено в [99], распределение плотности вероятности этих чисел подчиняется закону Пуассона. Число источников, находящихся в телесном угле, стягиваемом диаграммой направленности радиотелескопа, при смене направления приема колеблется около среднего числа N с дисперсией $\sqrt{N}$. Поэтому при перемещении диаграммы направленности по небу поток принимаемой суммарной мощности тоже изменяется случайным образом. При проведении обзоров неба было отмечено появление случайной нерегулярной составляющей в показаниях радиометра волнообразного характера с колебаниями во времени, определяемыми размером диаграммы направленности и скоростью ее перемещения по небу. Такая "запись" по форме похожа на регистрацию дискретных источников при наблюдениях со сканированием диаграммы, поэтому при составлении первых каталогов дискретных источников все эти отклонения были отождествлены с дискретными источниками, большинство из которых оказалось ложными и было обязано эффекту "путаницы".

Достаточно полно в отечественной литературе эффект "путаницы" рассмотрен в работах [7, 98, 99]. С учетом этого эффекта радиотелескоп должен создаваться таким, чтобы его разрешение, определяемое телесным углом $\Omega = (\lambda/L)^2$, было избыточным относительно его "апертурной эквивалентной" площади $\sim L^2$ в $L/2B$ раз, для крестообразных систем и в $2L/3B$ раз для Т-образных инструментов. Как показали расчеты, радиотелескоп уверенно регистрирует дискретные источники, если средняя плотность с предельно регистрируемым потоком ΔS из-за ограничения чувствительности по плотности потока такова, что один источник с таким потоком ΔS приходится на площадку неба размерами 30–50 диаграмм направленности [99]. Потоки нетеплового радиоизлучения источников обычно растут пропорционально длине волны в степени 0,7–0,8. Поэтому влияние эффекта "путаницы" сильнее сказывается на волнах декаметрового и метрового диапазонов, для которых поэтому прежде всего и были созданы радиотелескопы с незаполненной апертурой.

Радиотелескопы декаметрового диапазона волн имеют характерные особенности. Даже сравнительно слабо направленные антенны этого диа-

³ Английский термин "confusion" в нашей литературе иногда переводится как "путаница", иногда говорят об эффекте "насыщения", а в [4] такое явление называется шумами "разрешения".

пазона имеют большие габаритные размеры. Механические методы наведения таких инструментов становятся неприемлемыми, и целесообразнее применять многоэлементные антенные решетки с электрическим управлением положением диаграмм направленности в пространстве.

Для электрического управления диаграммой направленности в случае узкополосного приема удобно применять фазовый метод, при котором для сдвига направления максимума диаграммы фазы высокочастотных токов излучателей изменяют в пределах от 0 до 2π . Фазовый сдвиг $\Delta\varphi_d$, вводимый для фазирования сигналов излучателей, разнесенных на расстояние d , равен

$$\Delta\varphi_d = \frac{2\pi d}{\lambda} \cos \kappa - 2\pi n, \quad (1.21)$$

где λ — длина волны; κ угол между линией, соединяющей центры излучателей, и направлением максимума диаграммы направленности; $n = 1, 2, 3, \dots$

В другом способе фазирования для широкополосного приема применяют отрезки линии с временем задержки τ_d . Эти линии включаются в тракты фазированной решетки для тех излучателей, в которых есть опережение сигналов при наклонном падении волны, с тем чтобы скомпенсировать это опережение для углов $\kappa \neq 90^\circ$:

$$\tau_d = \frac{d}{c} \cos \kappa, \quad (1.22)$$

где c — скорость света. Если рассматривать отрезок линии с временной задержкой τ_d как фазовращатель, создающий сдвиг $\Delta\varphi_d = \omega\tau_d$, где $\omega = 2\pi f$, f — частота, то

$$\omega\tau_d = \frac{2\pi d}{\lambda} \cos \kappa. \quad (1.23)$$

Из (1.23) видно, что здесь воспроизводится полный фазовый сдвиг, возникающий вследствие запаздывания между сигналами от излучателей антенной решетки. При этом дисперсия всех фазовращателей такого типа независимо от d и κ одинаковая ($\Delta\varphi_d \propto \lambda^{-1}$). Следует, однако, отметить, что применение временного способа электрического управления лучом связано с созданием систем фазирования повышенной сложности из-за неидентичности управляющих устройств для разных d , а также из-за увеличения потерь в высокочастотных трактах, особенно в антеннах с большими линейными размерами [100, 101].

Этими методами фазирования можно формировать многолучевые диаграммы направленности антенной решетки с помощью диаграммообразующих матричных схем, построенных по фазовому или временному принципу. Применение матричных схем сложения сигналов в решетке позволяет получить одновременно несколько фазовых распределений тока по ее элементам по числу выделенных направлений параллельного приема (лучей). Процесс управления, как правило, сводится к переключению приемника к тем или иным выходам матричной схемы. По-видимому, такие инструменты наиболее эффективны и информативны для одновременных наблюдений по разным программам. Особенности работы таких радиотелескопов

в диапазоне частот и углов зависят от применения частотно-фазового или временного способа введения задержек.

В связи с большой технической сложностью таких антенных систем, созданных на основе только аналоговой антенной аппаратуры, перспективна разработка многолучевых многопрограммных инструментов при использовании как аналоговой, так и цифровой техники на базе современных ЭВМ.

Перейдем теперь к описанию важнейших отечественных радиотелескопов с незаполненной апертурой.

Комплекс радиотелескопа УТР-2. В отделении декаметрового радиоастрономии Института радиофизики и электроники (ныне Радиоастрономический институт) АН УССР был разработан и сооружен ряд декаметровых широкополосных инструментов с электрическим управлением лучом по двум координатам [102–104]. Наиболее эффективный из них — радиотелескоп УТР-2 (Украинский Т-образный радиотелескоп, модель 2) [105–113]. Этот инструмент был введен в пробную эксплуатацию в 1970 г. Для УТР-2 выбрана Т-образная конфигурация, при которой фазовый (геометрический) центр антенны не выходит за ее пределы, что упрощает прокладку антенно-фидерных коммуникаций к лабораторному зданию, расположенному в этом центре. Высокое разрешение при Т-образной конфигурации может быть реализовано при работе в корреляционном режиме. Как отмечалось выше в этом разделе, у таких антенн сравнительно высокий уровень боковых лепестков. Для Т-образной антенны радиотелескопа с помощью регулирования амплитуд токов по ее элементам можно получить требуемую форму диаграммы направленности в сечении вдоль оси, симметричной относительно центра антенны. Подавление лепестков в диаграмме ортогональной (несимметричной) антенны может быть проведено соответствующей спектральной обработкой принятых при наблюдениях сигналов. При радиоастрономических исследованиях удобнее, используя вращение Земли, получать непрерывные записи по часовому углу t , чем по склонению δ , поэтому симметричная часть Т-образной антенны была размещена в направлении север–юг. При этом низкий уровень боковых лепестков в плоскости меридиана (по склонению) обеспечивается требуемым законом распределения токов, а боковые лепестки в ортогональной плоскости подавляются с помощью соответствующей обработки записей в ЭВМ.

Антенные решетки радиотелескопа. Размеры трех антенн — северной, южной и западной, образующих Т-форму, были выбраны равными около 900 м. Требуемая эффективная площадь была обеспечена использованием эквидистантных многорядных решеток из вибраторов с расстоянием между ними вдоль меридиана d_1 и параллели d_2 (для ограничения дифракционных лепестков) $d_1 m_{\max} = d_2 l_{\max} = 0,5\lambda_{\text{ср}}$. В решетках были применены симметричные горизонтальные вибраторы, ориентированные вдоль параллели. Каждая из антенн "Север" и "Юг" УТР-2 была собрана из 720 вибраторов, образующих шесть ориентированных вдоль меридиана рядов по 120 параллельных вибраторов в ряду. Расстояние между соседними вибраторами во всех антеннах вдоль меридиана — 7,5 м и вдоль параллели — 9 м. Антенна "Запад" собрана из 600 вибраторов с расстоянием 9 м между ними и 5 м между рядами. Размеры и расположение антенн "Север", "Юг" и "Запад" указаны на рис. 1.23, общий

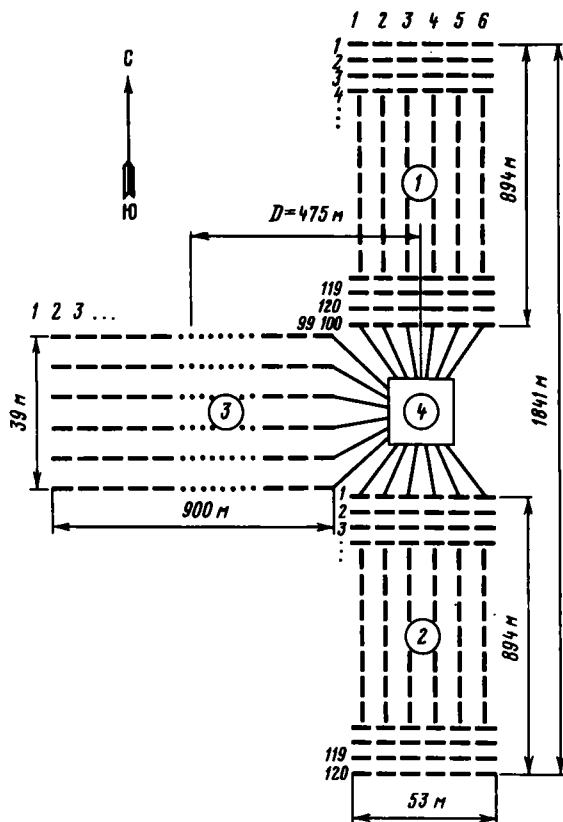


Рис. 1.23. Конфигурация и план радиотелескопа УТР-2

Цифры в кружках: 1 — антенна "Север"; 2 — "Юг"; 3 — "Запад"; 4 — коммутационно-аппаратурная часть

вид антенн "Север и Запад" — на рис. 1.24 [107]. В антенных решетках УТР-2 применены широкополосные вибраторы шунтового типа. Каждый из них состоит из двух проволочных цилиндров, переходящих в конусы на краях. Диаметр вибратора 1,8 м, общая длина — 8 м. Вибраторы установлены на вертикальных металлических мачтах на высоте 3,5 м от земли с использованием высокочастотных шунтов (металлических изоляторов). В центре каждого вибратора установлен широкополосный симметрирующий трансформатор для перехода к коаксиальному кабелю с волновым сопротивлением 75 Ом и реактивный четырехполосник для широкополосного согласования комплексных входных сопротивлений излучателей с фидером. По измеренным входным сопротивлениям вибраторов УТР-2 удалось синтезировать согласующие устройства [108], которые снизили потери из-за рассогласования до 2–9% в заданном секторе обзора на частотах от 10 до 25 МГц.

Система управления лучом. В УТР-2 применена временная система фазирования. При ее создании были разработаны новые принципы

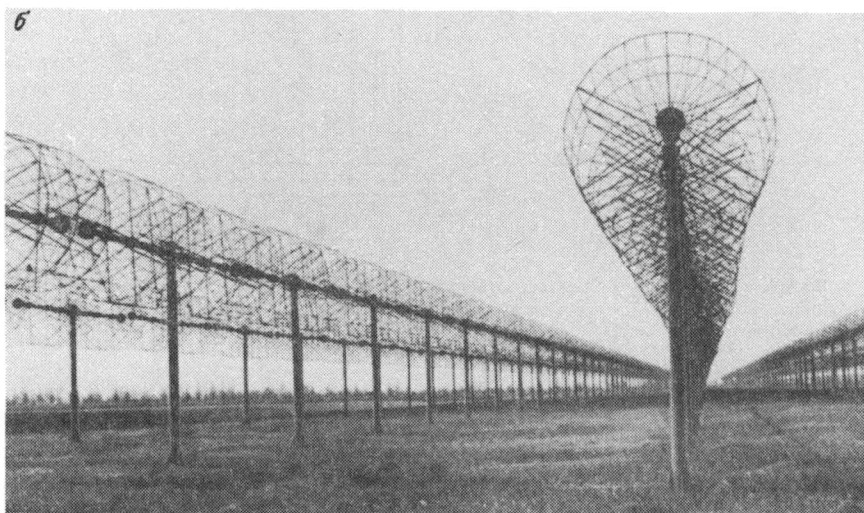
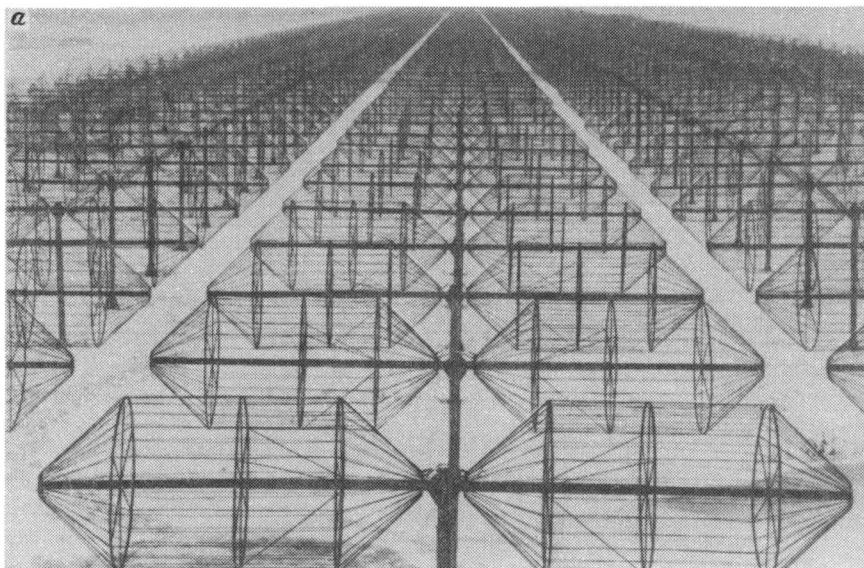


Рис. 1.24. Антенное поле радиотелескопа УТР-2
а – антенна "Север"; б – антенна "Запад"

построения временных систем [100–103, 107], отличающиеся основными особенностями:

а) система фазирования и суммирования сигналов строится по многостажной ("елочной") параллельной схеме;

б) диаграммы направленности (множители) различных этажей имеют разное число положений переключаемых направлений приема, т.е. управляются асинхронно;

в) фазирование проводится последовательно включаемыми, дискретно коммутируемыми отрезками линии временной задержки, построенными по двоичному принципу: m ячеек (разрядов) коммутируемой линии позволяют, как известно, получить 2^m значений временной задержки.

Дискретность переключения задержек обеспечивает высокую точность фазирования при дистанционном управлении аппаратурой. Дискретность движения луча при сканировании в этом случае вполне согласуется со свойствами реальной антенны как фильтра пространственных частот, имеющего конечную полосу пропускания.

Как известно, результирующая диаграмма направленности антенной решетки с многэтажной схемой фазирования является произведением диаграмм (множителей) всех этажей. Поскольку расстояния между точками фазирования при переходе от этажа к этажу увеличиваются, соответственно сужаются диаграммы направленности (множители) этажей с ростом номера этажа, начиная от плоскости антенной решетки. Учитывая, что сектор обзора множителей всех этажей должен быть одинаков, целесообразно иметь число положений временной задержки в каждом этапе фазирования разное – пропорциональное максимальному расстоянию между элементами, объединяемыми каждым фазовращателем данного этажа. В этом случае число требуемых положений диаграмм и, следовательно, число переключателей линий временных задержек в фазовращателях первых этажей, а таких в антенне большинство, может быть сравнительно небольшим, увеличиваясь с номером этажа. При этом лишь фазовращатели последнего этажа должны обеспечивать максимальное число временных задержек $N_{\max}$, равное полному числу направлений ориентировки максимума диаграммы направленности радиотелескопа

$$N_{\max} = 2^{m_{\max}}, \quad (1.24)$$

где $m_{\max}$ – максимальное число переключателей (двоичных разрядов) линий временной задержки.

В [107] подробно рассмотрена схема управления в пространстве множителями диаграммы направленности при асинхронном фазировании в антенной решетке типа УТР-2. Как показал анализ, допустимое снижение КНД при асинхронном поэтажном фазировании обеспечивается такой схемой сдвига множителей, когда при переходе к следующему этажу с более высоким номером удваивается число положений множителя, а направление пересечения при смежных положениях множителей этого этажа совпадает с направлением максимума множителя предыдущего этажа. Очевидно, что после переключения множителей при такой комбинации снижение КНД в направлениях пересечения получается небольшим. Если фазовращатели каждого этажа состоят из двоичных линий временной задержки, то оптимальному совмещению множителей соответствует одновременное включение одноименных (считая от старшего) разрядов линий всех этажей. Очевидно, что это обеспечивает большое удобство в управлении [107].

Удобство асинхронного фазирования сопряжено, однако, с искажениями диаграммы направленности антенной решетки и снижением ее КНД. Соответствующий выбор дискретности временных задержек (фазы) и чис-

ла коммутируемых элементов может уменьшить эти эффекты до допустимых значений [100, 101]. Рассматриваемые принципы построения временных систем управления лучом значительно сокращают число коммутирующих элементов и делают такие системы конкурентоспособными с фазовыми.

В УТР-2 используется система фазирования, состоящая из 439 фазовращателей с переключаемыми кабельными линиями задержки. Эти фазовращатели размещены в подземных коллекторах. Управление фазовращателями проводится дистанционно с пульта управления центральной аппаратной. Это обеспечивает возможность изменять направление приема радиотелескопа вручную или с помощью ЭВМ за доли секунды.

Антенны "Север", "Юг" УТР-2 разделены на секции по 180 вибраторов, а антенна "Запад" — по 150 вибраторов. Схемы фазирования и суммирования сигналов одной секции первых двух антенн приведены на рис. 1.25, а, а третьей антенны — на рис. 1.25, б. Фазирование в обеих секциях ведется по двум координатам, причем вначале вдоль коротких сторон антеннных решеток, так как при этом в каждой секции требуется только одна сложная система управления диаграммой направленности (высоконаправленным множителем). В соответствии с этим в секциях антенн "Север" и "Юг" (см. рис. 1.25, а) вначале фазироваются по l и суммируются сигналы шести вибраторов (1) вдоль линии запад–восток 34-разрядными фазовращателями ФВ-6-4⁴ (2), обеспечивающими 16 положений диаграммы направленности в секторе $l = \pm 0,833$. Линию север–юг фазирезуют (по m) с помощью асинхронной трехэтажной схемы, обеспечивающей 256 положений диаграммы направленности в секторе $m = \pm 1$. После фазовращателей ФВ-6-4 каждой секции сигналы фазировются шестью пятиразрядными фазовращателями ФВ-5-5 (3), затем двумя семиразрядными ФВ-3-7 (4) и одним восьмиразрядным ФВ-2-8 (5). В секциях антенны "Запад" (см. рис. 1.25, б) вначале фазироваются по l и суммируются сигналы шести вибраторов (1) вдоль линии север–юг 25 фазовращателями ФВ-6-4 (2), обеспечивающими 16 положений диаграммы направленности в секторе $m = \pm 1$. Фазирование по l двухэтажное, асинхронное. Оно ведется пятью пятиразрядными фазовращателями ФВ-5-5 (3) и одним семиразрядным фазовращателем ФВ-5-7 (4), позволяющими получить 128 положений луча в секторе $l = \pm 0,833$ [107].

Дальнейшее фазирование сигналов радиотелескопа проводится тремя основными системами управления лучом, приведенными на рис. 1.26 [107]. Фазирование между секциями с 1 по 12 ведется после усиления сигналов в антенных усилителях первого яруса (I). Секции антенн "Север" и "Юг" с 1 по 8 фазировются по l фазовращателем ФВ-8-11, а антенны "Запад" — фазовращателем ФВ-4-10, обеспечивающими 2048 и 1024 положений диаграммы направленности соответственно. Взаимное фазирование этих антенн выполняется по l фазовращателем ФВ-2-10 после дополнительного усиления сигналов антенными усилителями второго яруса (II). Вслед за этими усилителями включены гибридные разветвители (ГР), позволяющие получать независимые (развязанные) выходы всех секций (III) и (V) пар

⁴В обозначениях фазовращателей первая цифра — число суммируемых входных сигналов, вторая — число двоичных разрядов временной задержки.

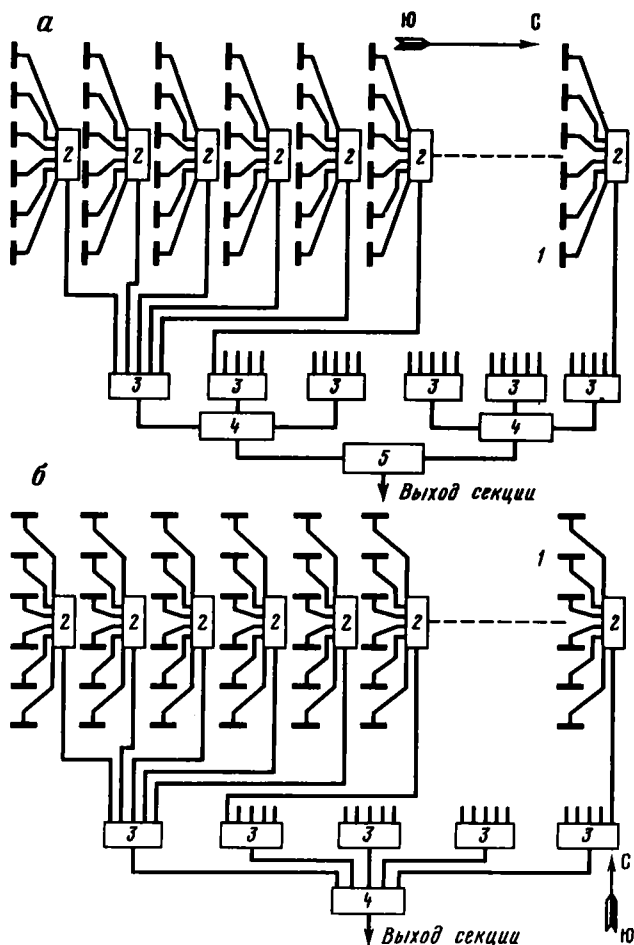


Рис. 1.25. Блок-схема фазирования одной секции антенны "Север" и "Юг" (а) и антенны "Запад" (б) УТР-2

секций (IV) и (VI) и четверок секций (VII) и (VIII). Аналогично после блока формирования пяти лучей (ФЛ) гибридные разветвители позволяют отдельно снимать сигналы высоконаправленных в одной плоскости лучей антенн "Север" и "Юг" (IX) и формировать путем перемножения с сигналом антенны "Запад" пять высоконаправленных в двух плоскостях лучей (X), по шесть выходов от каждого луча, для включения 30 каналов приемной радиометрической аппаратуры. Сигналы антенн перемножаются методом дискретной фазовой модуляции с помощью диодно-коммутационных модуляторов (М), периодически изменяющих фазу сигналов одной из антенн на 180° . На выходе модуляционных радиометров на частоте переключения выделяют напряжение, пропорциональное разности квадратов

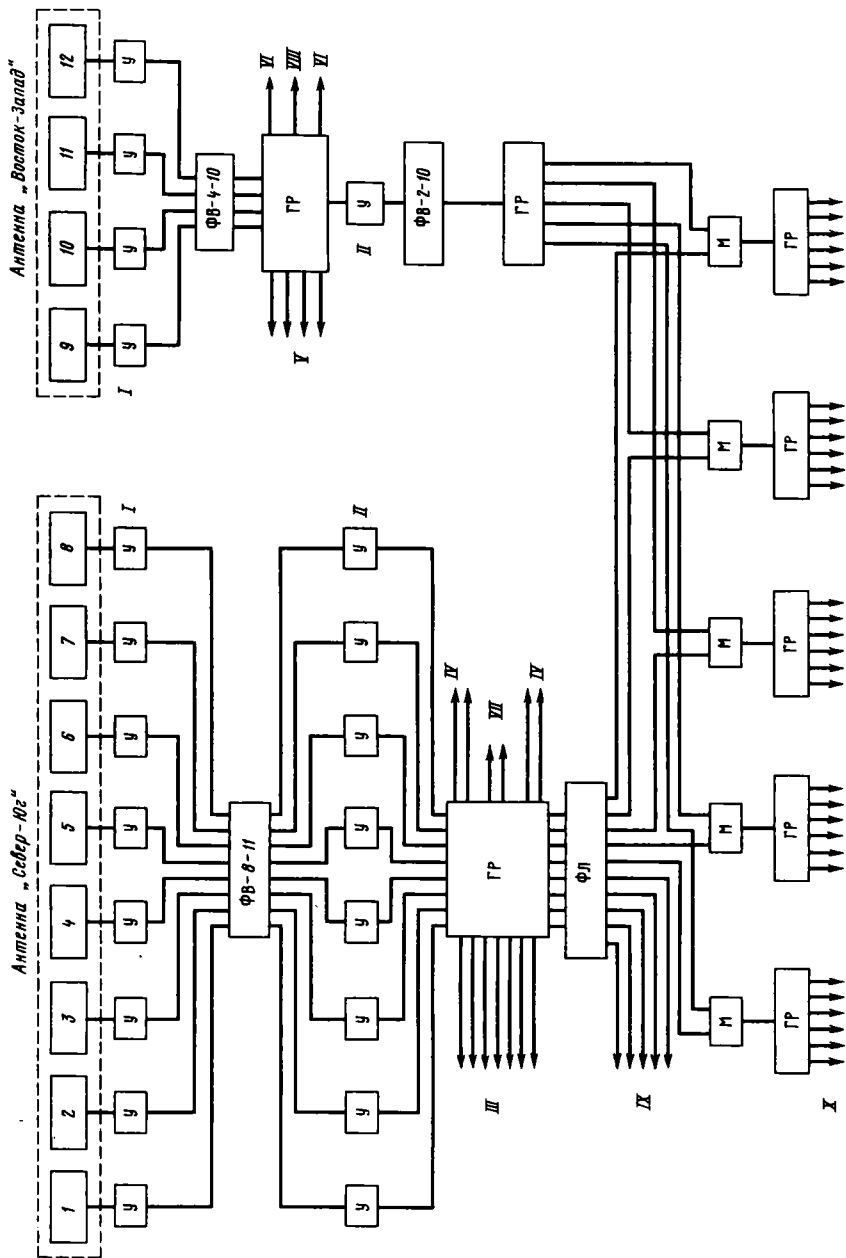


Рис. 1.26. Блок-схема СВЧ-системы радиотелескопа УТР-2

сигналов на выходе модуляторов:

$$U_{\text{вых}} \propto (\dot{U}_1 + \dot{U}_2)^2 - (\dot{U}_1 - \dot{U}_2)^2 = 4U_1U_2\cos\psi, \quad (1.25)$$

где ψ — разность фаз перемножаемых сигналов.

Хорошие свойства системы временного фазирования в диапазоне частот обеспечиваются тем, что в широкой полосе согласуются высокочастотные тракты и коммутируемые линии временной задержки, а также устраняются связи между каналами всех суммируемых сигналов. Для радиотелескопа УТР-2 были разработаны фазовращатели, состоящие из дискретно-двоичных линий задержки с числом коммутируемых разрядов в одном устройстве от 4 до 11, работающие в диапазоне 10–25 МГц с коэффициентом стоячей волны напряжения не более 1,15 и со среднеквадратичной фазовой ошибкой около 2° на один разряд задержки [107, 111].

Во всех фазирующих устройствах УТР-2 был использован принцип построения фазовращателя с фиксированным центром фазирования. При этом благодаря фазированию попарно симметричных относительно центра каналов сумма их задержек была постоянной. Это обеспечило постоянство фаз сигналов на их выходе при любых положениях диаграммы направленности, что упрощало фазирование разных групп излучателей, секций и антенн между собой. Применение гибридных (развязанных) сумматоров сигналов и трансформаторов сопротивлений [110] позволило устранить связи между трактами радиотелескопа и обеспечить в них хорошее согласование. В результате была реализована высокая точность распределения амплитуд и фаз токов излучателей антенных решеток и хорошее совпадение измеряемых характеристик УТР-2 с расчетными.

Системы фазирования антенн УТР-2 отличаются простотой методики управления лучом. Фазовращатели УТР-2 управляются в двоичном коде Грея. Управление ведется дистанционно с помощью ЭВМ, осуществляющей слежение по двум координатам; возможно и ручное управление с центрального пульта радиотелескопа. Для установки диаграммы направленности с помощью ЭВМ или пульта управления сигналы, определяющие направление приема в пространстве, подаются двумя параллельными кодами — 10-разрядным по l и 11-разрядным по m [107].

Система антенных усилителей. Как известно, в дециметровом диапазоне яркостная температура радиоизлучения фона Галактики составляет порядка десятков и сотен тысяч градусов. Поэтому в диапазоне рабочих частот УТР-2 потери в трактах его антенн фактически не влияют на качество приема при условии

$$T_{\Phi}\eta \gg \text{Ш}T_0, \quad (1.26)$$

где T_{Φ} — температура радиоизлучения фона; $T_0 = 300\text{К}$; η — КПД антенны; Ш — фактор шума радиоприемного устройства. В этом случае реализуется максимальная чувствительность радиотелескопа, определяемая его эффективной площадью $A_{\text{эф}}$ без учета потерь:

$$A_{\text{эф}} = G\lambda^2/4\pi \quad (1.27)$$

(G — коэффициент направленного действия (КНД)). При нарушении условия (1.26) происходит ухудшение отношения сигнала к шуму ($c/\text{ш}$),

определяемое как

$$\gamma = \frac{(c/\psi)_{\text{вх}}}{(c/\psi)_{\text{вых}}} = 1 + \frac{\mathcal{W}T_0}{T_{\Phi}\eta} \quad (1.28)$$

Для устранения этого эффекта, особенно существенного при применении временных систем фазирования из-за вносимых ими больших потерь, необходимо для компенсации этих потерь включать в тракты радиотелескопа антенные усилители (АУ). В этом случае отношение сигнал/шум повысится и будет определяться соотношением

$$\gamma = 1 + \frac{\mathcal{W}_1 K_1 \eta_{a2} + \mathcal{W}}{T_{\Phi} K_1 \eta_{a1} \eta_{a2}} T_0. \quad (1.29)$$

Здесь $\mathcal{W}_1$ — фактор шума; K_1 — коэффициент усиления АУ; η_{a1} — КПД той части антенны (секции), к которой подключается АУ; $\mathcal{W}$ — фактор шума приемного устройства; η_{a2} — КПД высокочастотных цепей антенны между АУ и приемным устройством ($\eta_{a2} = \eta/\eta_{a1}$).

Из-за насыщенности декаметрового диапазона интенсивными излучениями радиостанций в АУ возникают нелинейные эффекты, снижающие помехозащищенность радиотелескопа вследствие появления комбинационных помех. Для УТР-2 были разработаны новые АУ с высокой чувствительностью и достаточно большим динамическим диапазоном [109]. Исследования показали, что уменьшить нелинейные эффекты в широкополосных АУ можно построением их по многополосному принципу, ограничивая соответствующим образом коэффициенты усиления и парциальные полосы при усилении сигналов в одной ступени. В АУ УТР-2 для разделения на входе широкой полосы частот на ряд более узких и для синтезирования исходной необходимой полосы после усиления сигналов на выходе из узких полос применены цепочечные многополосные фильтровые схемы с согласованными входными и выходными сопротивлениями всех ячеек цепочек. Если при предельно допустимом усилении АУ не обеспечивается компенсация потерь всех включенных за ним антенных цепей, необходимы многэтажные схемы усиления. При этом усилители и цепи с потерями должны чередоваться таким образом, чтобы при заданной величине γ в условиях максимальных помех ни в одном из этажей антенного усиления не возникли нелинейные эффекты.

В радиотелескопе УТР-2 применена двухэтажная схема усиления, состоящая из 12 одноступенчатых усилителей первого этажа и девяти — второго (см. рис. 1.26). Для повышения помехозащищенности используются АУ с минимально требуемым усилением и амплитудно-частотной характеристикой "гребенчатого" типа, максимумы которой соответствуют участкам диапазона 10–25 МГц, где помехи минимальны. Точки включения АУ выбраны таким образом, чтобы на любой частоте при минимальном числе усилителей, как правило, не возникали нелинейные эффекты и чтобы сигнал/шум из-за шумов антенной и приемной аппаратуры не снизился более чем вдвое. Основные данные, характеризующие АУ УТР-2, приведены в табл. 1.6. Закон изменения усиления от частоты при заданной чувствительности был выбран в соответствии с частотной зависимостью яркостной температуры радиоизлучения фона Галактики и величиной

Таблица 1.6

Центральная частота, МГц	Полоса приема по уровню 0,7 МГц	Предельно допустимое усиление		Шум-фактор	$\bar{\gamma}_1$
		K_y^{max} , дБ	K_y , дБ		
10,0	0,85	20	19	5,7	1,1
12,6	1,0	25	23	5,5	1,1
14,7	1,3	30	25	4,8	1,2
16,7	1,45	35	27	3,9	1,2
20,0	1,6	40	33	2,7	1,3
25,0	2,1	45	39	2,1	1,5

антенных потерь. Чувствительность радиотелескопа с двухэтажной схемой усиления в ночное время практически не отличается от расчетной. Днем, когда резко возрастают радиопомехи, наблюдается падение чувствительности на несколько децибел.

Система формирования многолучевого приема. Существенное влияние рефракции декаметровых радиоволн в ионосфере приводит к тому, что невозможно точно измерить интенсивность космического радиоизлучения с помощью инструмента с однолучевой диаграммой направленности (одноканальный прием) [112]. Поэтому в УТР-2 формируется пятилучевая диаграмма направленности в меридиональной плоскости. Рефракция в ортогональной плоскости учитывается по изменениям записей космических радиоисточников со временем. Управление ориентировкой всех лучей в пространстве — общее, а выходы независимы. Таким образом, радиотелескоп обеспечивает возможность одновременных наблюдений по пяти каналам с пяти смежных направлений в интервале углов по склонению около 2° . Точное значение потока любого наблюдаемого радиоисточника определяется путем интерполирования данных наблюдений с нескольких направлений в нескольких каналах. Чтобы взаимное расположение пяти направлений приема в пространстве не зависело от частоты, для формирования многолучевой диаграммы направленности в УТР-2 используется матрица временного типа. Сигналы каждой из восьми секций антенн "Север" и "Юг" после взаимного фазирования в фазовращателе ФВ-8-11 (см. рис. 1.26) гибридными разветвителями делятся на пять каналов. Восемь сигналов каждого одноименного канала, кроме третьего, синхронно фазированы временным способом в определенном направлении относительно заданного и суммируются одноэтажной схемой (ФЛ). Сигналы третьего канала суммируются синфазно, образуя центральный луч, ориентированный в расчетном направлении [107].

Блок формирования многолучевой диаграммы направленности используют также для изменения уровня боковых лепестков в меридианной плоскости. Для этого в тракты всех секций, кроме четвертой и пятой, до суммирования сигналов последовательно с линиями задержки включены дискретно управляемые аттенюаторы. С помощью набора из шести синхронно переключаемых аттенюаторов каждого луча создают требуемое

симметричное относительно центра антенны распределение амплитуд, что позволяет регулировать уровень боковых лепестков в диаграмме направленности каждого канала приема. При регулировке амплитуд сигналов секций антенн "Север" и "Юг" диаграмма направленности УТР-2 $F(l, m)$, описываемая при равномерном токораспределении функцией, близкой

$\frac{\sin Nx/2}{N \sin x/2}$, приобретает в сечении по m вид

$$F(m, m_0) = T_{n-1}(z \cos y/n), \quad z = \operatorname{ch}(\beta/n - 1), \quad (1.30)$$

$$y = [N\pi d_1(m - m_0)]/\lambda,$$

соответствующий специальному (дольфовскому) [27] распределению весовых коэффициентов между сигналами секций [107]. Здесь T_{n-1} — полином Чебышева; n — число секций ($n = 8$); β — параметр, определяющий уровень боковых лепестков $1/R$ ($R = \operatorname{ch}\beta$); $x = 2y/N$; N — число фазизируемых рядов ($N = 240$); d_1 — расстояние между рядами ($d_1 = 7,5$ м). В схеме формирования многолучевой диаграммы направленности УТР-2 реализуются равноамплитудное и специальное (дольфовское) распределения амплитуд сигналов от секций с параметрами $\beta = 3,5$ и $4,5$, понижающее в меридианной плоскости уровень боковых лепестков на 11 и 20 дБ. Благодаря предварительному усилению сигналов КНД при этих регулировках, как и при формировании многолучевой диаграммы направленности, практически не меняется, падение КНД при таком снижении уровня лепестков составляет около 9 и 18% соответственно.

Примененный способ снижения уровня боковых лепестков обладает тем достоинством, что диаграмма направленности множителя восьми секций, описываемая полиномом Чебышева, умножается на равноамплитудную диаграмму направленности секции, благодаря чему амплитуда далеких боковых лепестков падает по мере удаления от главного приблизительно как $(|m - m_0|)^{-1}$. Это снижает рассеивание в области боковых лепестков по сравнению со случаем, когда чебышевская диаграмма направленности формируется для полной 240-элементной антенны "Север-Юг", что обеспечивает более высокий КНД радиотелескопа. Такой способ формирования диаграммы направленности с понижением уровня боковых лепестков дает результаты, близкие к оптимальным [114], при заметной технической простоте.

Системы высокочастотного контроля. Очевидно, что необходимо проводить периодический оперативный контроль параметров радиотелескопа, содержащего большое число радиосистем. В УТР-2 применены системы для непрерывной проверки контактного сопротивления всех реле аппаратуры фазирования и электрической изоляции (по постоянному току) ее высокочастотных цепей [107]. Кроме того, для радиотелескопа УТР-2 были разработаны две оригинальные системы высокочастотного контроля [113]. Для контроля излучателей антенных решеток и аппаратуры фазирования вдоль коротких сторон антенн (ФВ-6-4) применен принцип сравнения проверяемых излучателей и фазовращателей между собой во всем рабочем диапазоне частот. Для такого сравнения в антенных решетках УТР-2 выбираются три соседних ряда по шесть вибраторов каждый с использованием в качестве возбудителя среднего ряда и сравнением

между собой крайних. Возбуждая поочередно все ряды вибраторов от второго до предпоследнего каждой из трех антенных решеток УТР-2 проводят последовательную проверку всех излучающих элементов с симметрирующими и согласующими устройствами и фазовращателями ФВ-6-4. Подробно эта система контроля рассмотрена в [107]. Как показала длительная эксплуатация, этот контроль обладает большой чувствительностью и фиксирует не только неисправности, но и незначительное изменение передаточных характеристик каналов.

Для проверки аппаратуры фазирования высоконаправленных множителей (вдоль длинных сторон антенн) используется другая методика, основанная на измерении амплитудно-фазового распределения (дифференциальный контроль) и суммарной характеристики, соответствующей высоконаправленной диаграмме направленности антенны (интегральный контроль) [107, 113]. Для формирования контролируемой диаграммы направленности антенной решетки необходимо сфазировать и сложить сигналы со всех выходов системы фазирования, что позволяет получить зависимость суммарного контрольного сигнала от направления фазирования. В разработанной для такого контроля системе в качестве сумматора и фазирующего устройства используется согласованная с обоими концами высокочастотная линия, причем фазирование осуществляется методом, лежащим в основе частотного сканирования [107]. При сканировании частот выходной сигнал в системе контроля повторяет по форме диаграмму направленности равноамплитудной эквидистантной контролируемой решетки. При этом на электронно-лучевом индикаторе наблюдается в полярных координатах диаграмма направленности антенны с контролируемой системой фазирования. Подробно эта система контроля рассмотрена в [107].

Недостаток интегрального контроля связан с трудностью локализации обнаруженных неисправностей. В этом отношении удобен дифференциальный контроль, когда к контрольной линии подключается только один проверяемый канал, сигнал которого через эту линию поступает на измерительный вход индикатора. На другой вход индикатора, работающего в режиме линейного фазометра, подается сигнал, амплитуда и фаза которого при переключении каналов точно воспроизводит требуемое амплитудно-фазовое распределение падающих волн. Этот сигнал формируется с помощью специального эталонного фазовращателя и линии переменной длины. На индикаторе в этом режиме наблюдается отношение амплитуд и разность фаз сравниваемых сигналов. Таким образом, поочередно регистрируются амплитудные и фазовые ошибки падающих волн на выходах системы фазирования, что существенно упрощает и ускоряет процесс локализации неисправностей. По этому принципу контролируется аппаратура фазирования высоконаправленных множителей 12 секций и всех антенных усилителей УТР-2 [107].

При интегральном контроле по форме частотной зависимости контрольного сигнала можно оперативно судить об исправности системы фазирования. Отсутствие падающих волн в одном или нескольких каналах или ошибки в фазировании заметно сказываются на наблюдаемой диаграмме направленности и приводят к расширению главного лепестка, росту уровня боковых лепестков и их асимметрии. Измерению направления фазирования соответствует смещение наблюдаемой диаграммы направленности по часто-

те, что позволяет контролировать направление ориентировки луча. Дифференциальный контроль позволяет дистанционно определять амплитудные и фазовые характеристики отдельно для каждого из 340 каналов аппаратуры фазирования секций, обеспечивая полную автоматизацию процесса контроля при средней точности измерения по фазе около 3° и порядка 3—4% по амплитуде. Аппаратура управления системами контроля, а также индикаторы размещения в аппаратном зале радиотелескопа.

Характеристики радиотелескопа УТР-2. Радиотелескоп УТР-2 работает на штатных частотах $10,0 \pm 0,43$, $12,6 \pm 0,50$, $14,7 \pm 0,65$, $16,7 \pm 0,72$, $25,0 \pm 1,05$, $29,0 \pm 0,80$ с линейной горизонтальной поляризацией (направление запад—восток). Сектор обзора по часовому углу составляет не менее 4 ч, по склонению от -20 до 90° . Основные характеристики радиотелескопа рассчитывались и определялись экспериментально. На шести частотах от 10 до 25 МГц при различных по l и m положениях диаграммы направленности измерялись амплитудно-фазовые распределения токов излучателей, коэффициенты отражения от входных цепей излучателей, потери в земле, системах фазирования и высокочастотных коммуникациях антенн, а также проводился прием интенсивных дискретных источников радиоизлучения с хорошо известными координатами и потоками. Если известны параметры почвы, то максимальная погрешность определения КНД и эффективной площади составляла ± 4 и $\pm 6\%$ соответственно, а погрешность экспериментального определения КНД — около $\pm 5\%$. При учете этих параметров и поддержании их с помощью оперативных методов контроля инструмент мог использоваться как для относительных, так и абсолютных измерений плотностей потоков при различных радиоастрономических программах. Основные характеристики УТР-2 приведены в табл. 1.7.

Сооружение радиотелескопа УТР-2 было закончено к 1970 г., и после пусконаладочных работ с начала 1972 г. он находился в непрерывной эксплуатации. Опыт использования инструмента показал его универсальность и надежность. Он применяется для различных радиоастрономических наблюдений: измерения интенсивности излучения и спектров дискретных источников и протяженных источников космического радиоизлучения, изучения пульсаров, областей поглощения в НII, радиоизлучения Солнца и Юпитера, радиоспектроскопических наблюдений, измерения угловых размеров и распределений радиояркости космических радиоисточников. УТР-2 используется также в составе интерферометров (см. ниже). Большая эффективная площадь и рекордное для декаметрового диапазона разрешение, широкий сектор обзора с более чем $2 \cdot 10^6$ положений луча, оперативная смена направления приема, многолучевость, стабильность параметров, простота эксплуатации и экономичность УТР-2 делают его уникальным инструментом в своем диапазоне. Хотя в радиотелескопе установлено более ста тысяч различных радиоэлементов, высокая надежность большинства из них, а также наличие систем оперативного контроля и локализации неисправностей при резерве всех блоков позволяют быстро устранять дефекты. Реконструкция радиотелескопа УТР-2 позволит поднять его чувствительность и помехозащищенность, а также расширить диапазон частот от 10—25 до 8—32 МГц. Увеличение расщепляющей способности в декаметровом диапазоне с использованием радиотелескопа УТР-2 может быть получено с помощью дополнения его удаленными антеннами, образующими

Таблица 1.7

Характеристика	Радиотелескоп УТР-2	Антенна "Север—Юг"	Антенна "Запад"
Размеры, м	1841×925	1841×53	899×39
Число излучателей	2040	1440	600
$A_{\text{эф}}^{\text{max}}$ без учета потерь (на частоте 10 МГц, в зените), м ²	152 000 (в аддитивном режиме) 139 000 (в корреляцион- ном режиме)	107 000	45 000
Максимальный КНД (на частоте 25 МГц в зените)	11 200 (в аддитивном режиме)	8700	3600
Ширина диаграммы направ- ленности по мощности (на частоте 25 МГц, в зе- ните)	30'×30' (в корреля- ционном режиме)	30'×20° (по l и m)	30'×20° (по l и m)
Число положений луча	2 097 152 (2048 по m , 1024 по l)	32 768 (2048 по m , 16 по l)	16 384 (1024 по l , 16 по m)
Шумовая чувстви- тельность ($\Delta f = 14$ кГц, $\tau = 30$ с, $c/\text{ш} = 3$), Ян	10	15	30

интерферометрическую сеть. Ниже кратко рассмотрены особенности такой интерферометрической системы УРАН.

Декаметровые радиоинтерферометры УРАН. Учитывая большой научный интерес к исследованию структуры источников радиоизлучения на декаметровых волнах, в АН УССР начата разработка и строительство системы декаметровых интерферометров УРАН. Всего будет сооружаться четыре интерферометра с базами от 42,3 до 951 км, которые должны обеспечить максимальное угловое разрешение около 0,6". Схема размещения интерферометров системы УРАН с указанием относительных размеров приведена на рис. 1.27. В этих интерферометрах в качестве основного (базового) инструмента используется антенна "Север—Юг", описанного выше радиотелескопа УТР-2. Остальные антенны интерферометра выполнены в виде эквидистантных антенных решеток с расстоянием 7,5 м между соседними вибраторами вдоль линии запад—восток и север—юг с электрическим (временным) способом управления лучом. Антенные решетки содержат от 96 до 512 широкополосных излучателей, размещенных вдоль параллели в четырех (УРАН-1, УРАН-3, УРАН-4) или восьми рядах (УРАН-2), длиной до 230 м. Для устранения существенного в декаметровом диапазоне влияния поворота плоскости поляризации линейно-поляризованных радиоволн в ионосфере за счет эффекта Фарадея в этих антеннах используются турникетные излучатели. Каждый излучатель состоит из двух ортогональных линейных горизонтальных вибраторов шунтового типа, установленных на высоте 3,5 м над землей. Оси вибраторов ориентированы под углом $\pm 45^\circ$ к линии меридиана. В центре каждого турникетного излучателя находится

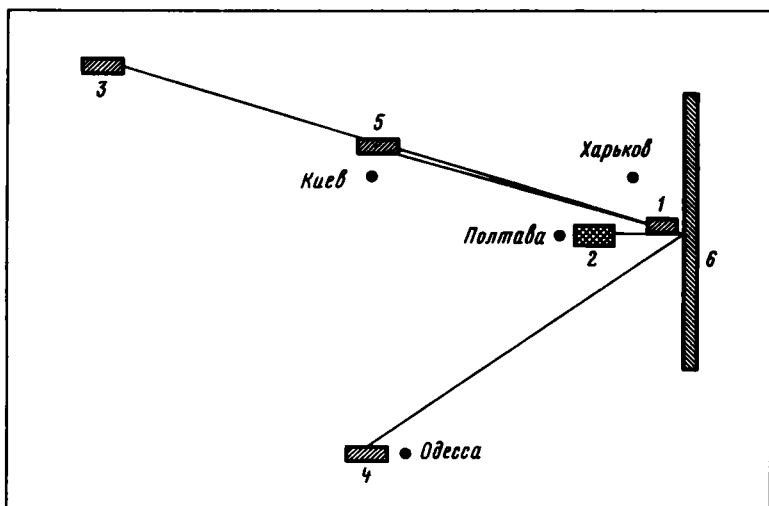


Рис. 1.27. Схема размещения интерферометров системы УРАН

1 — УРАН-1, число излучателей $N = 96$, расстояние до УТР-2 $R = 42,3$ км; 2 — УРАН-2, $N = 512$, $R = 152,75$ км; 3 — УРАН-3, $N = 218$, $R = 951$ км; 4 — УРАН-4, $N = 128$, $R = 614$ км; 5 — УРАН-5, $N = 256$, $R = 450$ км; 6 — антенна "Север-Юг" УТР-2, $N = 1440$

широкополосные симметрирующие и согласующие устройства вибраторов обеих линейных поляризаций. Одна из таких антенн (УРПН-1) с эффективной площадью 5000 м^2 приведена на рис. 1.28.

Вибраторы каждой из линейных поляризаций имеют свою автономную аппаратуру фазирования сигналов, управляемую синхронно. Таким образом, каждая такая антенная решетка фактически представляет собой две совмещенные антенны для одновременного приема двух ортогональных (при приеме из зенитного направления) линейно-поляризованных волн с раздельными выходами. На рис. 1.29 приведена блок-схема управления лучом для одной из линейных поляризаций антенны УРАН-1 [115]. В антенне используются две такие идентичные временные системы фазирования, построенные по двоичному принципу и позволяющие дискретно управлять лучом по двум угловым координатам l и m в секторе обзора $1 \geq l \geq -1$, $1 \geq m \geq -1$. При этом в антенных системах УРАН, учитывая их относительно небольшие размеры, применен синхронный способ управления положением диаграммы направленности с временной системой фазирования. В этом случае диаграммы направленности (множители) разных этажей при многоэтажной схеме фазирования антенны имеют одно и то же число положений в пределах сектора обзора антенны, определяемое самым высоконаправленным множителем последнего этапа фазирования. Дискретность управления диаграммой направленности выбиралась таким образом, чтобы падение КНД и эффективной площади антенны $A_{эф}$ по каждой из координат l и m не превышало 1,5% в худшем случае, соответствующем максимальной рабочей частоте 25 МГц, а результирующее падение КНД и $A_{эф}$ было не больше 3%. При этом диаграммы направленности антенны по полю

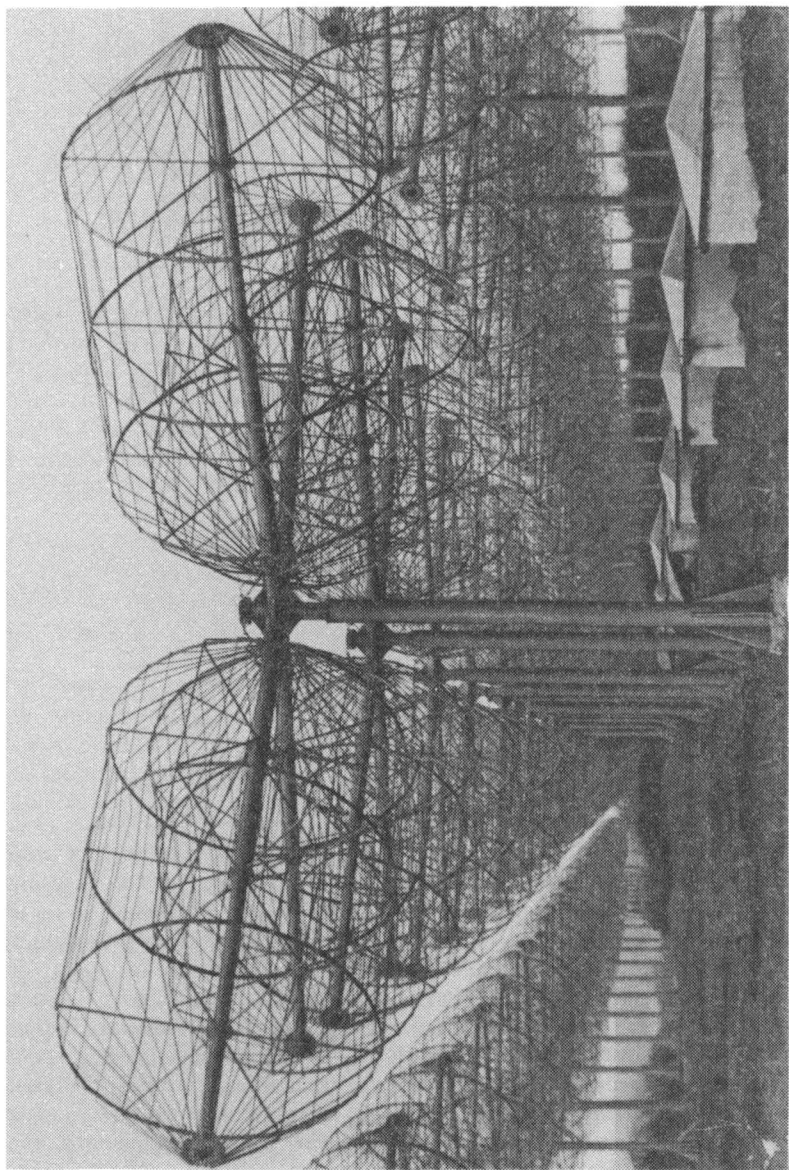


Рис. 1.28. Антенна УРАН-1

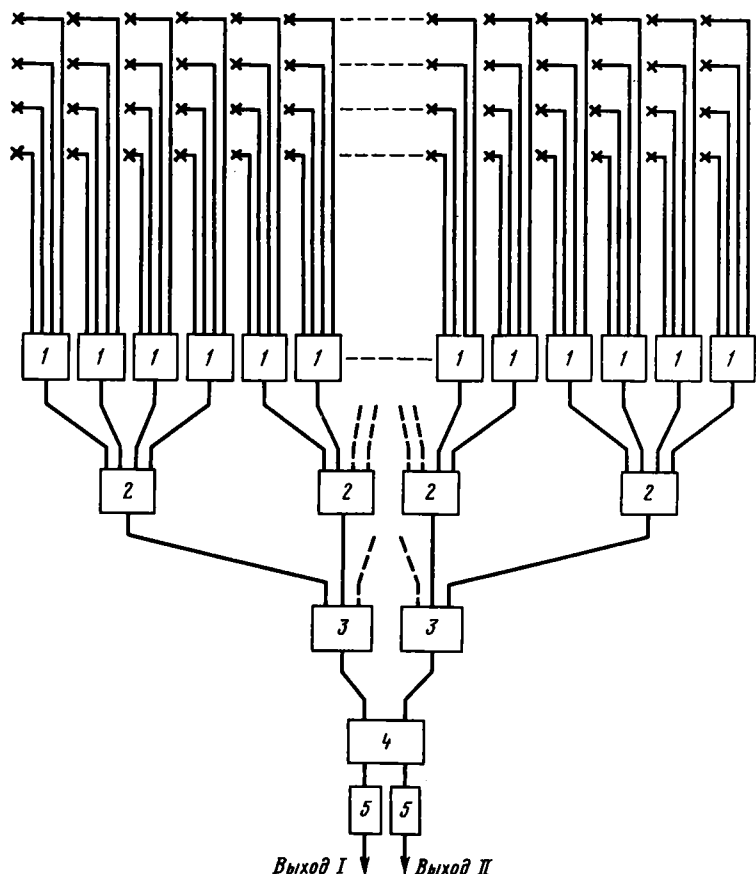


Рис. 1.29. Блок-схема системы фазирования антенны УРАН-1

для их соседних положений пересекались вблизи уровня 0,99. Для выполнения указанных условий система фазирования должна была обеспечивать 16 положений диаграммы направленности по m и 128 положений по l в полном секторе обзора, т.е. иметь соответственно четыре и семь разрядов временной задержки. Учитывая размеры и число вибраторов антенны, фазирование по m целесообразно проводить одноэтажной схемой, а по l — многоэтажной. При этом технически целесообразно вначале фазировать вибраторы вдоль короткой стороны антенны по m рядам идентичных простых блоков временной задержки и лишь затем вдоль длинной стороны по l одной более сложной системой фазирования. В соответствии со сказанным в антенне УРАН-1 сигналы от четырех вибраторов, расположенных вдоль направления север—юг, фазировались по m и суммируются 24 четырехрядными фазовращателями (1), которые обеспечивают 16 положений диаграммы направленности в секторе обзора ± 1 (см. рис. 1.29). Фазирование по l проводится трехэтажной схемой, обеспечивающей 128 положений диаграммы направленности в секторе обзора ± 1 . Первый этаж состоит

из 16 семиразрядных фазовращателей (2), каждый из которых фазирует и суммирует сигналы 16 вибраторов с выходов четырех фазовращателей (1). На втором этаже сигналы 48 вибраторов с выходов каждых трех фазовращателей (2) фазируются и суммируются двумя фазовращателями (3). На третьем этаже одним фазовращателем (4), подключенным к выходам двух фазовращателей (3), фазируются сигналы всех 96 вибраторов одной линейной поляризации. На выходах этого фазовращателя сформированы результирующие сигналы западной и восточной половин антенны (выходы I и II), которые усиливаются широкополосными помехоустойчивыми антенными усилителями (5) [109].

Все фазовращатели систем фазирования антенны УРАН выполнены по схеме, обеспечивающей фиксированную фазу результирующего сигнала на выходе. Основным их элементом являются коммутаторы временной задержки, выполненные аналогично фазовращателям радиотелескопа УТР-2. Управление фазирующей системой проводится как с помощью ЭВМ, так и по командам с пульта. На первом интерферометре УРАН-1 с базой 42,3 км, ориентированной вдоль параллели, с угловым разрешением 15'' проводятся наблюдения в реальном времени. Для получения интерференционной записи, образуемой путем перемножения высокочастотных сигналов, принятых антеннами интерферометра, используется радиорелейная линия, по которой сигнал антенны "Север-Юг" радиотелескопа УТР-2 ретранслируется к приемному пункту антенны УРАН-1.

Уже первые радиоинтерферометрические наблюдения в декаметровом диапазоне волн показали, что в этом случае малопригодны методики определения функции видимости, применяемые на более высоких частотах (см. гл. 2). Это объясняется очень сильной нестационарностью интерференционных сигналов и отсутствием достаточно интенсивных источников, которые можно использовать в этом диапазоне в качестве эталонных. Аналогично обстоит дело с применением на декаметровых волнах интерферометров с переменной базой. В связи с этим измерения в интерферометрах УРАН могут проводиться только по интерференционному сигналу от исследуемого объекта. Для этого огибающую этих сигналов сопоставляют не с результатами измерений эталонного объекта, а с огибающей искусственной интерферограммы, полученной в результате специальной градуировки. При этой градуировке на выходы устройства, проводящего перемножение принятых в разнесенных пунктах интерферометра сигналов (коррелятора или ЭВМ), подаются два полностью скоррелированных шумовых сигнала, причем мощности полезных сигналов на каждом из выходов перемножителя при измерениях и градуировке должны быть одинаковы либо их отношение известно. Таким образом, прием интерферометром сигналов эталонных объектов заменяется сигналом гипотетического точечного источника с $\gamma = 1$, воспроизводимого специальной градуировкой [116]. При такой методике, кроме наблюдения интерференционных биений, необходимо одновременно измерять мощности принимаемых от исследуемого объекта сигналов на выходе каждой из антенн интерферометра для сопоставления их с градуировочными сигналами.

С этой целью все антенные системы УРАН разделены на две равные части с антенными усилителями на выходе. Для интерферометрических измерений сигналы половин антенны суммируются, а для измерений мощности

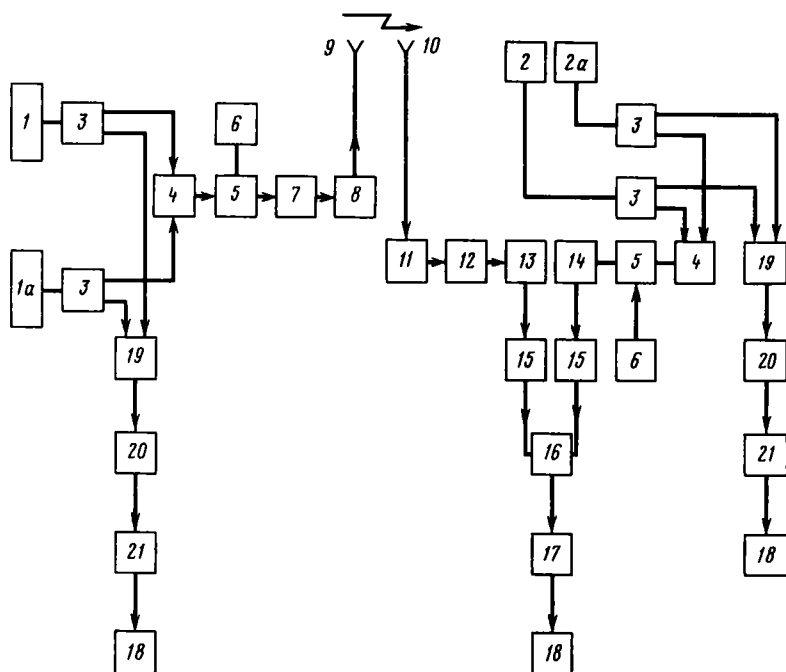


Рис. 1.30. Блок-схема интерферометра УРАН-1

сигналов на выходе антенн перемножаются с помощью модуляционных радиометров с дискретной фазовой модуляцией $0-\pi$. Блок-схема интерферометра УРАН-1 приведена на рис. 1.30. Здесь (1) и (1a) — северная и южная половины антенны УТР-2, а (2) и (2a) — западная и восточная половины антенны УРАН-1. Сигналы каждой половины антенны делятся гибридными разветвителями (3) на равные части (без ухудшения отношения сигнал/шум), после чего с одних выходов разветвителей они поступают на гибридный сумматор (4), а с других — на дискретный фазовый модулятор (19). Суммарный сигнал антенны "Север-Юг" УТР-2 после усиления и соответствующих преобразований в приемнике (5) с высокостабильным гетеродином (6), в котором применен рубидиевый стандарт частоты с синтезатором, поступает на радиорелейную аппаратуру — модулятор (7) радиопередатчика (8), подключенный к передающей антенне (9). Принятый в другом пункте интерферометра антенной (10) ретранслированный сигнал после усиления и преобразования в приемнике радиорелейной станции (11) поступает на усилитель низкой частоты (12) и через регулируемый аттенюатор (13) и полосовой фильтр (15) на один из входов коррелятора (16). Суммарный сигнал каждой из линейных поляризаций антенны УРАН-1 с выхода приемника (5) подается на линию регулируемой временной задержки (14) и с выхода линии через полосовой фильтр (15) — на второй вход коррелятора (16). Выходной сигнал коррелятора через усилитель с фильтром интерференционных частот (17) подается на системы аналоговой и цифровой записи (18). Измерение мощности сигналов на вы-

ходе обеих антенн проводится модуляционными радиометрами с дискретной фазовой модуляцией. Эти радиометры состоят из фазовых модуляторов (19), радиоприемников (20), модуляционных выходных устройств (21) и системы записи (18).

Для исследования эффекта Фарадея и устранения его влияния на определение модуля функции видимости γ наблюдаемого радиоисточника измерения на УРАН-1 ведутся одновременно для двух линейных поляризаций принимаемого антенной УРАН-1 космического радиоизлучения. При этом результирующее значение γ определяется по двум его составляющим для 1-й и 2-й линейных поляризаций.

$$\gamma = \sqrt{\gamma_1^2 + \gamma_2^2} \xi, \quad (1.31)$$

где ξ — поправка, учитывающая, что линейные поляризации антенн УРАН ортогональны только при приеме из направления в зенит. Величина ξ зависит от зенитного расстояния источника и равна 1 при приеме из зенита [116]. Для проведения таких измерений необходимы два одинаковых комплекса аппаратуры приемного пункта УРАН-1, приведенной на рис. 1.30, кроме блоков (10)–(15), которые, как и аппаратура пункта УТР-2, используются для обеих линейных поляризаций.

Другой способ наблюдений на интерферометрах УРАН, при котором эффект Фарадея не влияет на измерения γ , реализуется при работе антенны с турникетными излучателями в режиме приема сигналов с круговой поляризацией. Известно, что турникетный излучатель, расположенный в горизонтальной плоскости, излучает (или принимает) сигналы с круговой поляризацией при сдвиге фаз токов излучателей $\pm 90^\circ$ в направлении зенита, когда векторы линейно-поляризованных волн равны по модулю и ортогональны в пространстве. Однако при приеме из других направлений даже в плоскости симметрии (плоскости меридиана для всех антенн УРАН) эти условия нарушаются: не выполняется условие ортогональности линейно-поляризованных волн в пространстве. В общем случае при передаче или приеме в произвольном направлении эти волны не равны и по амплитуде. Создать вращающееся по кругу поле с помощью турникетного излучателя или антенной решетки из таких излучателей в произвольном направлении можно, если неортогональность линейно-поляризованных полей в пространстве скомпенсировать соответствующей неортогональностью высокочастотных токов излучателей по фазе (во времени). Для интерферометров декаметрового диапазона УРАН разработана схема, с помощью которой можно принимать волны с правой и левой круговой поляризацией для турникетного излучателя в направлениях, отличных от зенитного. Эта схема подробно рассмотрена в [115]. На одном из двух выходов схемы получают сигнал левой или правой круговой поляризации. Сигналы одной из круговых поляризаций с одного из выходов подают на гибридные разветвители (3) (см. рис. 1.30). Все остальные радиосистемы интерферометров УРАН при этом работают так же, как и при приеме сигналов с линейной поляризацией. Естественно, что в этом случае в приемных пунктах УРАН используется один комплект радиоприемной и радиометрической аппаратуры.

Отметим, что все интерферометры системы УРАН, кроме УРАН-1, предназначены для режима радиоинтерферометра со сверхдлинной базой

(РСДБ) (см. гл. 2) с независимой записью сигналов на магнитную ленту и с последующей обработкой данных в ЭВМ. С этой целью сигналы двух линейных поляризаций (или одной круговой) с выходов приемника (5) (см. рис. 1.30) подаются на магнитографы, где ведется магнитная запись принимаемого радиоизлучения одновременно с сигналами точного времени. Для формирования этих сигналов используются часы высокостабильного стандарта частоты, синхронизируемые и контролируемые по сигналам точного времени, которые передаются по радио и телевизионным каналам.

В течение ряда лет ведутся измерения на интерферометре УРАН-1. С осенне-зимнего сезона 1986–1987 гг. начались наблюдения на интерферометре УРАН-4. В ходе этих измерений обнаружены и исследованы новые компактные детали источников с большими спектральными индексами в радиогалактиках и в нескольких остатках вспышек сверхновых звезд, а также протяженные компоненты в квазарах, которые еще не наблюдались на более высоких частотах. Эти эксперименты показали, что в декаметровом диапазоне возможны радиоинтерферометрические измерения с угловым разрешением порядка $1''$, хотя и с существенно большими трудностями, чем на метровых и более коротких волнах.

Радиотелескоп ДКР-1000 ФИАН [9, 117–124]. Этот инструмент создан в ФИАНе СССР на Радиоастрономической научной станции в Пушино [9]. В целом это сложный радиотехнический комплекс. Его антенные системы работают в диапазоне 30–120 МГц, перекрывая две октавы, что дает этому инструменту уникальные возможности в наблюдениях и объясняет его название — диапазонный крестообразный радиотелескоп — ДКР-1000 ФИАН. Впервые в ФИАНе для таких радиотелескопов было предложено применить большие антенны с рефлектором в виде параболических цилиндров [117]. Позже за рубежом стали широко использовать такие антенны для крестообразных инструментов [3]. В диапазоне метровых и дециметровых волн применение параболических цилиндров в качестве рефлекторов позволило получить большие собирающие (эффективные) площади радиотелескопов при достаточной простоте антенно-фидерных систем. Очевидно, что уменьшение длины волны при переходе от декаметровых волн к метровым и дециметровым ведет к увеличению числа излучателей в решетке пропорционально квадрату отношения длин волн при одной и той же площади. Так, если бы телескоп создавался по схеме УТР-2 на волну 1 м, то потребовалось бы на площади 150 тыс м^2 разместить, соединить и сфазировать порядка 300 тыс. волновых вибраторов. Если в радиотелескопе с антенной решеткой сканирование необходимо проводить по двум координатам, то в антенне с параболическим цилиндром управление диаграммой направленности электрическими методами фазирования нужно вести только по одной координате, так как по другой координате можно просто поворачивать рефлектор вокруг его горизонтальной оси. Очевидно также, что эффективная площадь параболического цилиндра при его повороте остается постоянной, что дает ему заметные преимущества сравнительно с фазированной антенной решеткой, особенно при работе в направлениях, близких к горизонту.

В обоих плечах радиотелескопа ДКР-1000 использованы рефлекторы типа параболического цилиндра размером 1000×40 м с фокусным расстоянием 15 м. Разработанный в конце 50-х годов этот инструмент в метро-

вом диапазоне — один из самых больших по геометрической площади ($80\,000\text{ м}^2$). На рис. 1.31 приведены фотографии антенн "Восток—Запад" (В—З) и "Север—Юг" (С—Ю) этого телескопа.

Рефлектор антенны, расположенной с запада на восток, образован проволоками, проложенными по 37 параболическим фермам (размер по стягивающей параболу хорде — 40 м). Проволоки из нержавеющей стали диаметром 2 мм длиной 1 км пропущены через втулки на промежуточных фермах с интервалом 10 см и крепятся только на концевых фермах. Усилия от всех 430 натянутых проволок на двух концевых фермах передаются на анкерные опоры системой тросов, сходящихся в гибкий вал длиной примерно 5 м, с помощью которого удалось просто решить проблему мощного концевой опорного подшипника, который стал не нужен. На каждой из 37 ферм установлены мачты для крепления облучателя и контррефлектора. По концам этих мачт и краям контррефлектора проходят тросы. Масса концевых ферм около 3,5 т, промежуточных — порядка 2,2 т. Они изготовлены из тонкостенных стальных труб.

Параболические фермы антенны В—З установлены на опорах высотой около 25 м с интервалом 28 м между ними. На верхних площадках опор установлены электродвигатели с червячными редукторами (передача 1:120 000) для поворота рефлектора антенны по углу места. Поворот контролируется индикаторной сельсинной системой по положению центральной фермы. Так как каждая ферма поворачивается с помощью индивидуального привода и возможно рассогласование их положения больше допустимых норм ($\pm 30'$), то для защиты от рассогласования создана система контроля на основе дифференциальных сельсинов, с помощью которых положение каждой фермы сравнивается с положением центральной с погрешностью около $5'$. Релейная система защиты останавливает поворот антенны, если рассогласование положения ферм выше допустимого; она же может провести коррекцию положения ферм в полув автоматическом режиме [118]. Практически для поворота антенны В—З от зенита до горизонта требуется около 30 мин.

Вторая антенна крестообразного радиотелескопа, ось которой расположена с севера на юг, установлена неподвижно на земле. Ее рефлектор выполнен также в форме параболического цилиндра размером 964×40 м, фокусное расстояние — 15 м. Между его северной и южной частями, в центре "креста", оставлен свободный промежуток в 60 м, чтобы разместить конструкции антенны В—З.

Рефлектор антенны С—Ю сделан из биметаллических проволок диаметром 2 мм с расстоянием 10 см между ними. Они проложены параллельно проводам антенны В—З и в отличие от нее идут поперек образующей рефлектора. Для их крепления вдоль антенны по металлическим стойкам натянуты тросы (по четыре в каждой полупараболе). Проволоки рефлектора проложены поперек этих тросов и провисают между тросами по цепной линии, близкой к параболе. В центре параболического цилиндра с интервалом 24 ч установлены опоры для крепления тросов, к которым крепятся вибраторы облучателя и контррефлектор шириной 4,8 м. В рефлекторе (в его средней части) установлены рельсы технологической дороги, по которой передвигается технологическая вышка для монтажа и ремонта облучателя.

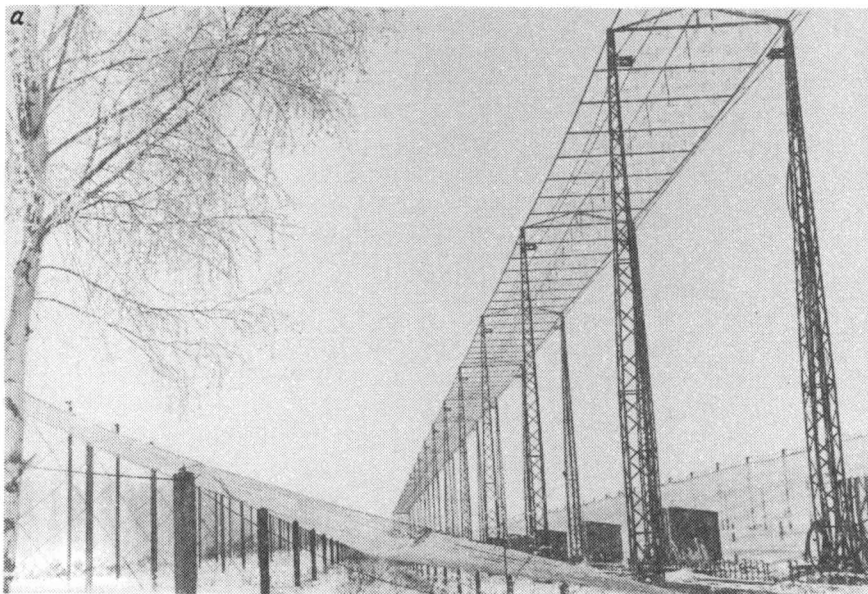
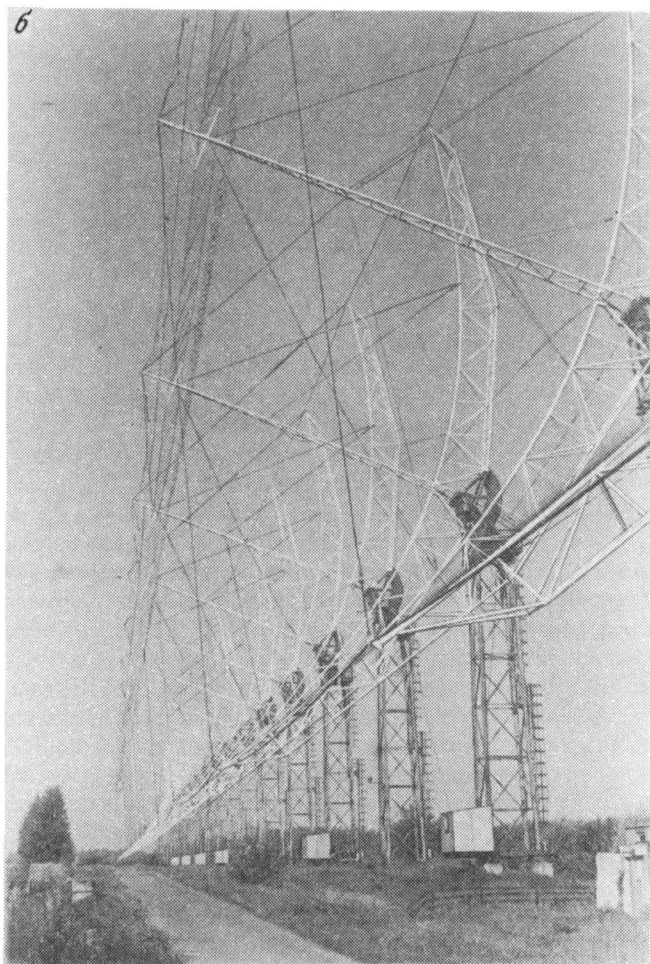


Рис. 1.31. Диапазонный крестообразный радиотелескоп ДКР-1000 ФИАН
а — антенна "Север—Юг"; *б* — антенна "Восток—Запад"

Северная и южная половины антенны С—Ю, содержащие по 18 секций длиной 24 м, входят в состав крестообразного телескопа (геометрическая площадь 34 560 м²), а оставшиеся несколько секций используются по отдельным программам.

Многолучевая (в общем виде) диаграмма направленности антенны С—Ю управляется по углу места электрическим способом с помощью фазирующих систем, работающих в диапазоне 30—120 МГц. Они будут рассмотрены ниже.

В облучателях антенн В—З и С—Ю радиотелескопа ДКР-1000 ФИАН применяются диапазонные шунтовые вибраторы, созданные по схеме Айзенберга—Кузнецова для работы в диапазоне частот 30—120 МГц [119]. Ось вибраторов ориентирована с запада на восток. Длина плеча вибратора 1,5 м, диаметр 30 см. Из восьми приводов вибратора диаметром 2 мм в параллельный шунт проходят два провода. Индуктивное сопротивление шунта вместе с емкостной составляющей входного сопротивления вибратора образуют резонансный контур на частотах около 35 МГц с низкой добротностью за счет заметного сопротивления излучения на этих частотах. Это увеличивает рабочий диапазон вибратора до двух октав. Параметры вибратора подобраны так, чтобы получить хорошее согласование с фидером с волновым сопротивлением 600 Ом на частотах 80—90 МГц. Потери из-за рассогласования на частотах 30—40 МГц порядка 40—50% практически не сказываются на чувствительности телескопа на этих частотах, поскольку, как и в случае УТР-2, на этих частотах высокие яркостные температуры радиоизлучения фона Галактики определяют шумовую температуру систем радиотелескопа.



Фидерная система облучателя антенны В-3 и С-Ю радиотелескопа ДКР-1000 выполнена по этажно-елочной схеме, которая обеспечивает равенство длин электрических путей от каждого вибратора до приемника при синфазном состоянии фазовращателей фазируемых систем. До трактов с волновым сопротивлением 75 Ом сложение фидеров выполнено с понижением вдвое волнового сопротивления ($600:300:150:75$), а в трактах с сопротивлением 75 Ом для сложения используются широкополосные трансформаторы с коэффициентом трансформации сопротивления 1:2. Для перехода от симметричных фидеров к коаксиальным разработаны широкополосные симметрирующие устройства с коэффициентом трансформации 1:1 для антенны В-3 и 4:1 — для антенны С-Ю [119, 124].

Диаграмма направленности радиотелескопа ДКР-1000 ФИАН управляется по зенитному расстоянию в пределах от 85 до 35°. Для этого антенна

В-3 поворачивается вокруг своей горизонтальной оси, а многолучевая диаграмма антенны С-Ю устанавливается в выбранное направление в плоскости меридиана с помощью фазированных систем и выбором частоты приема в полосе $\pm 2,5\%$. Диаграмма направленности антенны С-Ю в плоскости, перпендикулярной меридиональной, достаточно широкая (несколько градусов). Поэтому для крестообразного радиотелескопа осуществлен режим слежения за объектом наблюдения в пределах этой диаграммы за счет управления диаграммой направленности при фазировании антенны В-3.

Такое управление проводится в радиотелескопе ДКР-1000 с помощью диапазонной системы сканирования антенны В-3, позволяющей отклонять диаграмму от меридиана в секторе $\pm 2^\circ$ по часовому углу за счет фазирования сигналов от секций антенны В-3 [122]. Эта система приведена на рис. 1.32, *a*, на котором показаны блок-схема антенно-аппаратурных систем радиотелескопа ДКР-1000 ФИАН. В системе сканирования антенны В-3 фазовращатели дискретного типа ФВ-3-5 (*a*, *b*) и ФВ-2-5 (*c*) обеспечивают 31 положение диаграммы направленности антенны В-3 (по 15 в обе стороны от центрального, меридианного положения) с шагом в $7,5'$ независимо от частоты. В этих фазовращателях используется "реохордный" принцип включения фазированных отрезков кабеля (при включении в восточном плече отрезка длиной l в западном такой же отрезок выключается и наоборот). Такая система фазирования сохраняет постоянство длины тракта, что необходимо при работе антенны В-3 в составе крестообразного телескопа или в интерферометре [122].

На рис. 1.32, *б* приведена блок-схема антенны С-Ю. Диаграмма направленности секций с номера 1 по номер 36 управляется по зенитному расстоянию с помощью трехэтажной схемы из фазовращателей ФВ-2-5. Эта первая внутрисекционная диапазонная система фазирования выставляет в 31 положение с шагом около 3° диаграмму направленности каждой секции антенны С-Ю (ширина по половинной мощности $7,2^\circ$ на частоте 100 МГц). В облучателе такой секции длиной 24 м установлено 16 вибраторов, первоначально объединенных синфазно парами (фазируются уже восемь синфазных пар вибраторов облучателя). Эта схема на рис. 1.32 опущена. Внутрисекционная система работает, как и в УТР-2 по временному принципу компенсации запаздывания сигналов между вибраторами секции. Поэтому направление приема секции не зависит от частоты.

Вторая система фазировки сигналов от секций. В этой межсекционной системе используются зонированные фазовращатели типа ФВ-2-5 (см. рис. 1.32, поз. *d-i*). Система обеспечивает сдвиг диаграммного множителя решетки антенны С-Ю (36 элементов, расстояние 24 м) в 31 положение симметрично относительно зенита с шагом $1,5^\circ$. При этом вместе с главным максимумом диаграммы решетки (нулевой лепесток дифракционной картины), очевидно, будут с таким же шагом смещаться и все остальные дифракционные лепестки, положение которых в пространстве определяется также и частотой приема. Для точного выбора направления приема находят ближайший дифракционный максимум, включают необходимое минимальное число линий задержек, чтобы "привинуть" его к этому направлению, и корректируют частоту в пределах $\pm 2,5\%$ от заданной [123]. Такое частотно-временное фазирование дает возможность уменьшить снижение эффективной площади из-за экспоненциальности в амплитудном

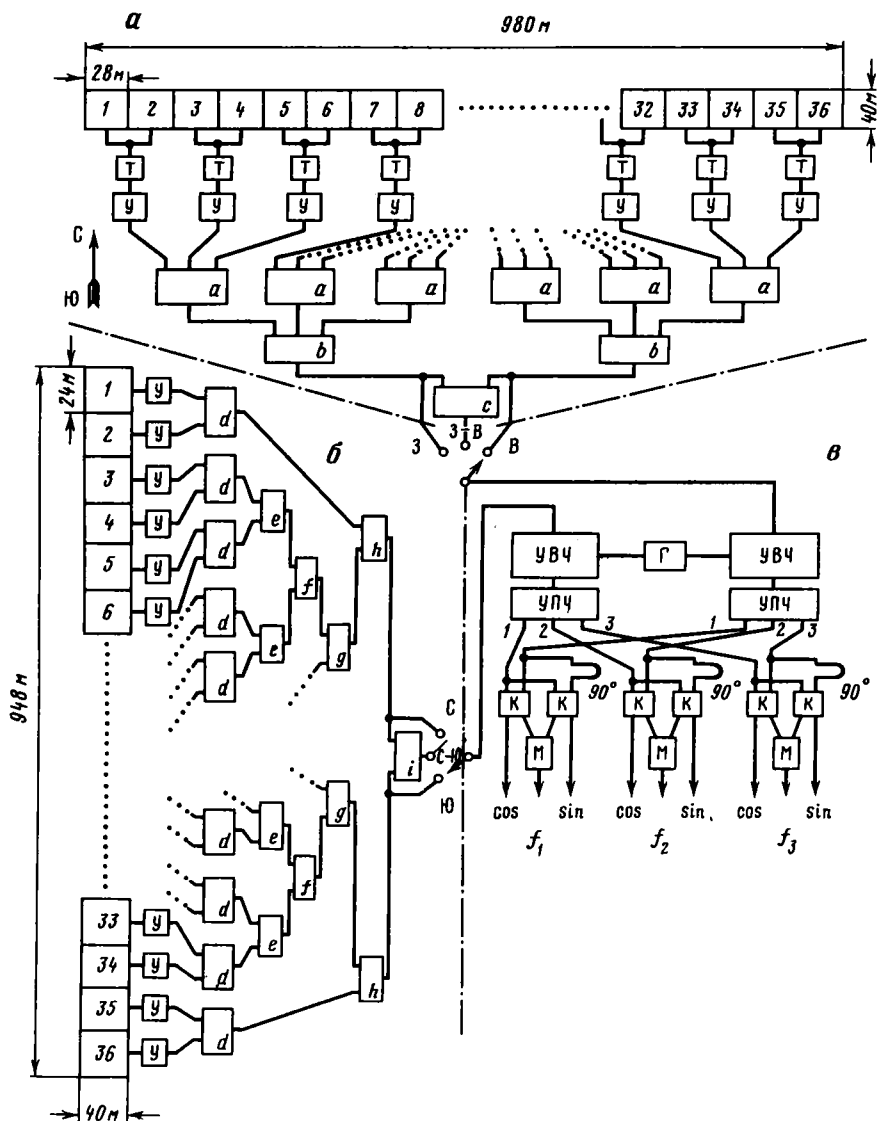


Рис. 1.32. Структурная схема радиотелескопа ДКР-1000 ФИАН

а — антенна "Восток-Запад"; *б* — антенна "Север-Юг"; *в* — корреляционная приемная система; Т — трансформатор (сумматор); У — усилитель; *а*, ..., *и* — фазовращатели; УВЧ — усилитель высокой частоты; Г — гетеродин; УПЧ — усилитель промежуточной частоты; К — коррелятор; М — схема формирования модульного выхода; sin — синусный выход; cos — косинусный выход

распределении, вносимом фазовращателями, имеющими заметные потери на метровых волнах. Кроме этого, использование частотной зависимости положения дифракционных максимумов решетки секций антенны С—Ю позволяет простым разделением частот приема (например, соответствующей фильтрацией в каналах промежуточной частоты радиометра) сформировать многолучевую по склонению диаграмму направленности крестообразного радиотелескопа и организовать многострочный обзор неба [120, 124].

Естественно, что в антенной системе метрового диапазона волн протяженностью порядка 1 км фидерные тракты обладают заметными потерями. Для ДКР-1000 КПД тракта по диапазону частот 30—120 МГц изменяется от 25 до 5%. И если на длинноволновом конце диапазона эти потери при высокой яркостной температуре фона Галактики еще не сильно снижают чувствительность инструмента, то на коротковолновом конце без дополнительных выносных антенных усилителей, расставленных по секциям антенны, чувствительность может снизиться в несколько раз (10—20 раз). Поэтому в радиотелескопе ДКР-1000 ФИАН в обеих его антеннах установлены идентичные антенные усилительные модули [121]. Они работают в диапазоне от 38 до 120 МГц с коэффициентом усиления 25—28 дБ, фактором шума порядка 2—2,5. Для защиты от помех, создаваемых телевизионными и УКВ—ЧМ-радиостанциями, на входе усилительных модулей установлены блоки сменных фильтров, переключаемых дистанционно с помощью высокочастотных реле. (В дневное время можно выбрать самую узкую полосу пропускания частот от 100 до 120 МГц, в ночное время можно "открыть" весь диапазон 38—120 МГц.) В полосе 30—38 МГц наблюдения можно вести без дополнительного усиления вследствие высокой яркостной температуры фона Галактики.

Для корреляционной обработки сигналов в целях перемножения ножевых диаграмм направленности обеих антенн телескопа ДКР-1000 применяется многоканальный радиометр с синусно-косинусным и модульным выходами [120] (см. рис. 1.32, в). Достаточно часто антенны В—З и С—Ю радиотелескопа ДКР-1000 используются по отдельным программам как самостоятельные большие и эффективные инструменты. В этих случаях применяются различные радиометры и анализаторы спектра, работающие в диапазоне 30—120 МГц (многие из них входят в состав комплекса радиотелескопов БСА ФИАН).

Основные параметры радиотелескопа ДКР-1000 ФИАН приведены ниже:

Диапазон рабочих частот	30—120 МГц
Геометрическая площадь рефлекторов (в крестообразном включении)	73 000 м ²
Разрешающая способность (на частоте 100 МГц)	10'
Чувствительность по потоку (отношение с/ш = 3, $\Delta f = 500$ кГц, $\tau = 1$ с)	0,8 Ян
Чувствительность, определяемая эффектом "путаницы" (с/ш = 3, $f = 100$ МГц)	0,5 Ян
Управление диаграммой по часовому углу	$\pm 120'$
по склонению	от 90 до -15°

Радиоастрономические исследования, начатые уже в 1964 г. с вводом антенны В-3, принесли много ценных, впервые полученных на метровых волнах результатов наблюдений. С помощью ДКР-1000 успешно исследуются дискретные источники и пульсары. При использовании антенны С-Ю были обнаружены впервые в метровом диапазоне радиолинии поглощения углерода в межзвездных облаках [126].

Антенна В-3 ДКР-1000 использовалась как основной антенный элемент радиоинтерферометра с переносной базой, созданного в ФИАНе в 1971 г. для работы на частоте 85,5 МГц [125]. Для выносного пункта была изготовлена передвижная антенна в виде синфазной решетки из 128 излучателей типа волнового канала. Сигнал, принятый на выносном пункте, и частота гетеродина приемника этого пункта транслировались на основной пункт, к ДКР-1000, по радиорелейному каналу. Максимально достижимая база интерферометра определялась приемепопередающими параметрами этого канала и составляла 30–40 км в зависимости от трассы. На этом интерферометре были изучены структуры нескольких сот дискретных источников с разрешением в $20''$ на волне 3,5 м [9].

Сибирский солнечный радиотелескоп (ССРТ) [9, 127–134]. Этот уникальный радиотелескоп, созданный в СибИЗМИРе СО АН СССР, предназначен для систематических исследований Солнца на волне 5,2 см. Обоснование необходимости создания такого программно-ориентированного инструмента, выбор его основных параметров и принципа действия приведены в [127].

По своему функциональному назначению этот инструмент является радиогелиографом, с помощью которого формируется радиоизображение Солнца с разрешением около $20''$ в течение нескольких минут времени. ССРТ является крестообразным радиотелескопом с дифракционными решетками из полноповоротных параболоидов в его обоих плечах. Среди существующих инструментов подобного типа ССРТ отличается большими базовыми размерами, высоким угловым разрешением, в котором радиоизображения Солнца можно получить с помощью матрицы лучей.

Большим преимуществом ССРТ является возможность регистрировать динамику солнечной активности в течение всего дня, наблюдать с высоким угловым разрешением на Солнце строение активных областей, в том числе и в поляризованном излучении.

Сантиметровый диапазон волн для этого инструмента параллельного апертурного синтеза был выбран потому, что в солнечных исследованиях фундаментальная проблема связана с физикой активных областей в нижних слоях солнечной короны. И специфика этого большого радиотелескопа во многом определилась его рабочей длиной волны 5,2 см. Весьма приемлемой для этого диапазона является схема крестообразного радиотелескопа из двух ортогонально расположенных рядов следящих параболоидов, впервые в радиоастрономии созданная для работы на длине волны 21 см Христиансеном в Австралии [3]; поэтому такие системы инструментов часто называют радиотелескопами типа "крест Христиансена".

Радиотелескоп ССРТ, общий вид которого приведен на рис. 1.33, состоит из двух дифракционных решеток, расположенных одна с севера на юг, другая – с востока на запад (рис. 1.34). Его базовая длина 622 м. В каждой решетке по 128 антенных элементов – полноповоротных параболоидов

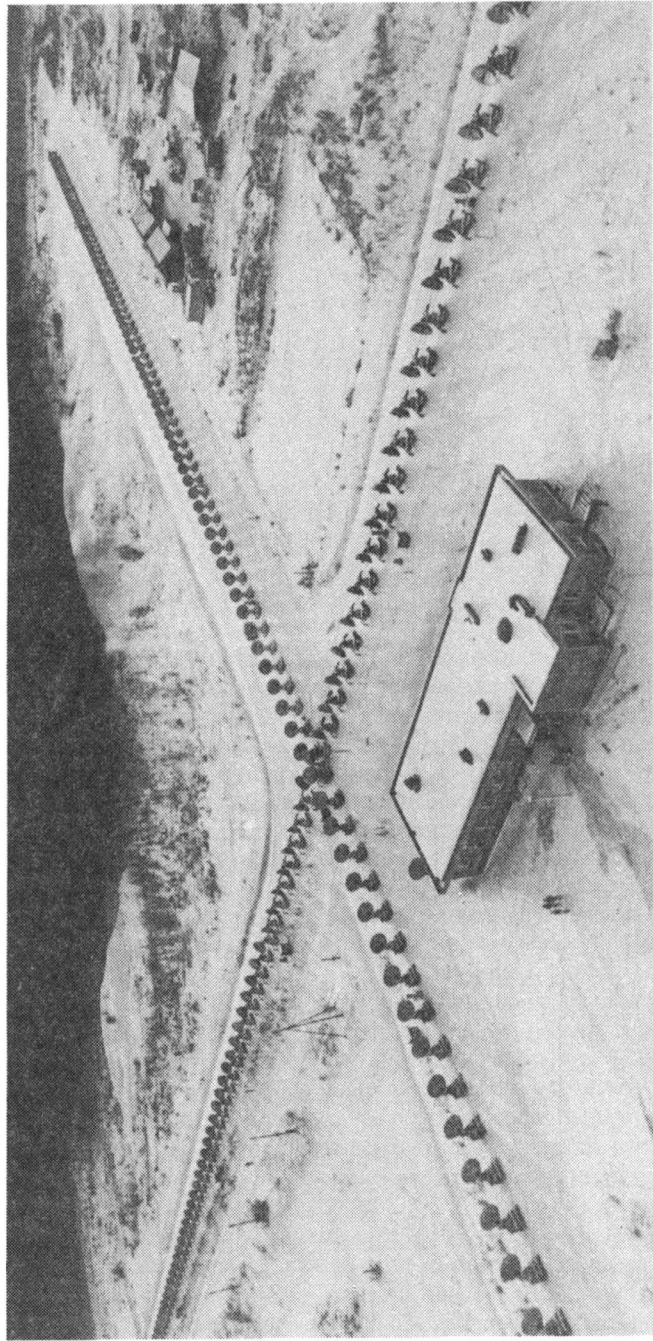


Рис. 1.33. Крестообразный Сибирский солнечный радиотелескоп СИБИЗМИР СО АН СССР (ССРТ)

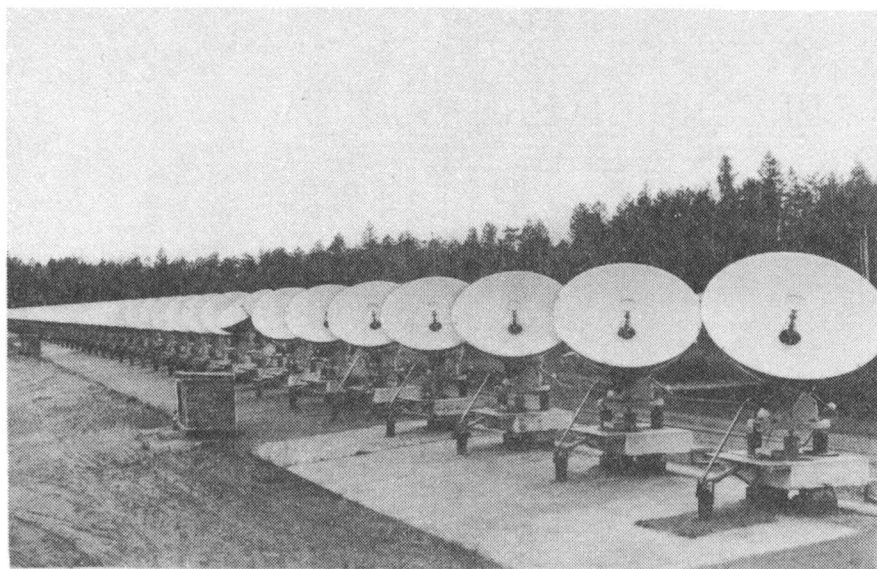


Рис. 1.34. Антенная решетка восток–запад ССРТ

диаметром 2,5 м на экваториальной монтировке, расставленных с интервалом 4,9 м с приводами по часовому углу на основе шаговых двигателей.

Наведение на Солнце и его длительное сопровождение антенными элементами в процессе наблюдений ведется в ССРТ с управлением от ЭВМ. Шаговые двигатели после начальной установки нуль-пунктов шкал антенных элементов обеспечивают с высокой точностью синхронные повороты всех параболоидов по часовому углу без обратных связей в следящих цепях. В ССРТ общая управляющая система на основе нескольких мини-ЭВМ лишь контролирует число импульсов в цепях питания шаговых двигателей, объединенных в группы по несколько параболоидов в каждой. Экваториальная монтировка антенных элементов позволила существенно упростить решение приводной задачи для обеспечения длительного слежения за Солнцем.

Сравнительно короткофокусное параболическое зеркало антенного элемента ССРТ выполнено из стеклопластика с последующей металлизацией поверхности. Большое внимание уделено точности изготовления как собственно рефлектора, так и его монтировки. Были приняты специальные методы геодезической выверки установки антенных элементов в радиотелескопе, чтобы свести к минимуму фазовые ошибки, которые возникают в "кресте Христиансена" из-за ошибок в координатах установки осей его элементов. Антенные элементы в ССРТ установлены на свайных фундаментах. При этом сваи забиты на большую глубину и термоизолированы от окружающего грунта с помощью труб, чтобы при сильном промерзании не было существенных деформаций. Многолетние геодезические выверки реперных точек на антенных основаниях подтвердили правильность таких технических решений, принятых с учетом климатических условий Сибири.

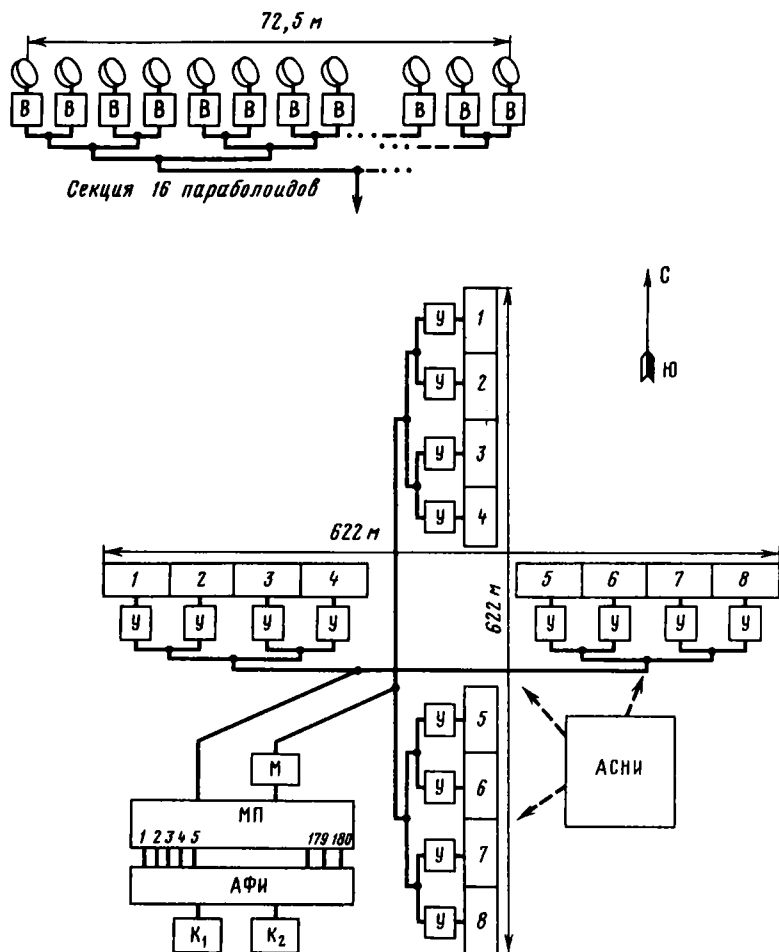


Рис. 1.35. Структурная схема радиотелескопа ССРТ

1, 2, ..., 8 — секция по 16 параболоидов диаметром 2,5 м (вверху рисунка); В — волноводный вращающийся переход; У — усилитель СВЧ; М — фазовый модулятор; МП — многоканальное многочастотное приемное устройство; АФИ — аппаратура формирования изображения Солнца; K_1 и K_2 — каналы интенсивности и круговой поляризации; АСНИ — многомашина автоматизированная система научных исследований (сопровождение, автофазировка, управление приемником, накопление и обработка данных, контроль исправного состояния систем)

На рис. 1.35 приведена структурная схема радиотелескопа ССРТ [128]. Антенны "Север", "Юг", "Восток", "Запад" разделены на секции (в каждой по восемь). В секцию входят по 16 параболоидов. Облучатели параболоидов дают возможность регистрировать как полную интенсивность, так и круговую поляризацию радиоизлучения Солнца. После вращающихся переходов все 16 антенных элементов секции объединены волноводной фидерной системой по многоступенчатой схеме. На выходе такой секции установлен антенный транзисторный предусилитель СВЧ (шумовая температу-

ра $T_{\text{ш}} = 1000$ К, коэффициент усиления 25 дБ). Восемь секций каждой антенны соединяются после предусилителей волноводами по многоэтажной схеме. Для оперативного выравнивания электрических длин частей такой волноводной разветвленной сети создана система автоматической фазировки трактов по шумовому источнику сигнала [128, 132]. Усилители и вся волноводная система ССРТ размещены в туннеле на глубине около 2 м, где достаточно хорошо стабилизируется температура. Таким образом, все антенные элементы каждого плеча крестообразного радиотелескопа соединены в синфазную решетку, поэтому в пространстве у такой решетки существует последовательность дифракционных лепестков, отстоящих для ССРТ друг от друга более чем на $35'$. При крестообразном расположении антенн пересечение дифракционных лепестков решетки дает сетку карандашных лучей, находящихся в узлах матрицы, отстоящих примерно на $35'$. Поскольку положения дифракционных лепестков с номером выше нулевого зависят от частоты, то, применяя частотное распределение каналов приема, можно получить, как и в радиотелескопе ДКР-1000 ФИАН, многолучевую диаграмму направленности для многократного построения радиоизображения Солнца при его прохождении по последовательности дифракционных лучей [135, 136].

Формирование многолучевой диаграммы направленности ССРТ проводится с помощью 186-канальной приемной аппаратуры с фазовым модулятором в тракте одного плеча ССРТ (как в радиотелескопе УТР-2). Одновременная регистрация интенсивности и круговой поляризации привела фактически к удвоению числа каналов в аппаратуре формирования радиоизображения и довела их до 372.

Управление работой антенных и приемных систем, контроль рабочих параметров, диагностика распределения поля по антенным элементам, сбор, накопление и обработка данных выполняются многомашинной автоматизированной системой научных исследований [133, 134]. Ниже приведены основные параметры радиотелескопа ССРТ:

Рабочая длина волны	5,2 см
(полоса частот)	5670–5790 МГц
Геометрическая площадь антенн	1250 м ²
Разрешающая способность	17"
Чувствительность по яркостной температуре ($c/\text{ш} = 1$, $\Delta f = 500$ кГц, $\tau = 1$ с)	4000 К
Отношение $c/\text{ш}$ для локальных источников на фоне спокойного Солнца [119]	35
Длительность сопровождения Солнца	до 12 ч
Время регистрации двумерной карты Солнца	3–9 мин

Сибирский солнечный радиотелескоп является уникальным сложным антенно-аппаратурным комплексом, предназначенным для глубокого исследования физики Солнца, и прежде всего для изучения солнечной активности и динамики явлений в солнечной атмосфере. Уже при эксплуатации первой очереди ССРТ (антенны В–3), когда обеспечивалось одномерное разрешение до 17", были получены новые, до этого недоступные сведения об ак-

тивных областях на Солнце и микроволновых всплесках его радиоизлучения [137].

В этом разделе были рассмотрены основные радиоастрономические инструменты нашей страны, принадлежащие классу телескопов с незаполненной апертурой. Это уникальные антенные системы, в которых в полной мере использованы современные методы и техника фазирования, многоканальная приемная аппаратура и высокoeffективные средства вычислительной техники и автоматики. Создатели этих инструментов, используя принципы построения радиотелескопов с незаполненной апертурой в диапазоне от декаметровых до коротких сантиметровых волн, внесли большой вклад в развитие и укрепление экспериментальной наблюдательной научной базы советской радиоастрономии. Следует подчеркнуть, что по целому ряду своих параметров (разрешающей способности, чувствительности, "диапазонности") рассмотренные выше советские радиотелескопы превосходят зарубежные инструменты своих классов.

1.4. Радиотелескопы с фазированными решетками

Рассмотренные выше многоэлементные радиотелескопы с незаполненной апертурой были разработаны с целью достижения высокого разрешения, когда для наблюдений дискретных источников потребовалось "избыточное" разрешение [4]. Характерные "каркасные" структуры таких инструментов: крест, Т-форма, кольцо и др. — в сочетании с корреляционными способами обработки сигналов выделили эти инструменты в класс систем с незаполненной апертурой. Эти инструменты позволяют ослабить влияние эффекта "путаницы" и привести в соответствие разрешающую способность и чувствительность инструментов.

В процессе развития радиоастрономии были открыты квазары и пульсары, а в радиогалактиках были обнаружены компактные ядра. При наблюдениях эти компактные объекты мерцают из-за влияния неоднородной межпланетной плазмы. Мерцающие источники являются хорошими зондами при изучении плазмы в околосолнечном пространстве [9]. Использование эффекта мерцаний позволяет обнаружить компактные составляющие в дискретных источниках, а также выделить возможные кандидаты в пульсары (см. также гл. 5).

Предельная чувствительность при наблюдении компактных источников не сильно ограничивается эффектом "путаницы", так как плотность этих объектов на небе меньше плотности дискретных источников, поэтому для их наблюдений можно создавать радиотелескопы с заполненной апертурой [138]. Создание таких радиотелескопов в диапазоне декаметровых, метровых и дециметровых волн весьма эффективно для исследования межпланетной и межзвездной плазмы, изучения структуры компактных источников и пульсаров. Для решения этих задач становится возможным создавать достаточно большие собирающие площади радиотелескопов при умеренном разрешении. При наблюдении мерцающих источников эффект "путаницы", например на волне 3 м, начинает проявляться и ограничивать чувствительность при увеличении площади инструментов свыше 50—70 тыс. м² на средних элонгациях примерно 30—40° от Солнца [138].

В декаметровом и метровом диапазонах волн можно использовать дву-

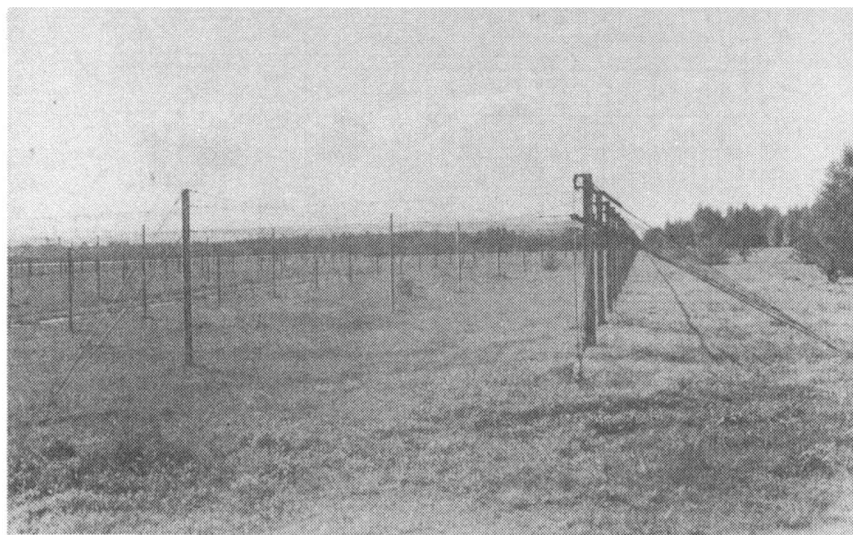


Рис. 1.36. Антенное поле радиотелескопа БСА ФИАН

мерные антенные фазуемые решетки, заполняющие большие площади. Такие антенные системы были созданы в СССР и за рубежом в конце 60-х — начале 70-х годов в короткие сроки [9]. В Советском Союзе это радиотелескоп БСА ФИАН площадью около 80 тыс. м² [139]. Среди зарубежных можно отметить антенную систему Кембриджского университета площадью 16 тыс. м² [140], с помощью которой были обнаружены пульсары в 1967 г. Как правило, в антенных системах таких радиотелескопов используются вибраторные фазированные решетки с электрическим управлением диаграммой направленности.

Радиотелескоп БСА ФИАН [9, 139, 141, 142]. Этот инструмент с заполненной апертурой, работающий на волне около 3 м, создан в ФИАНе (Пушино), рядом с радиотелескопом ДКР-1000 [9]. Его антенна выполнена в виде фазуемой решетки. В метровом диапазоне волн Большая сканирующая антенна (БСА) ФИАН — самая большая в мире. Она предназначена главным образом для исследований пульсаров, окосолнечного пространства с помощью просвечивания его компактными радиоисточниками (методом мерцаний), а также структуры самих мерцающих источников и межзвездной среды по мерцанию пульсаров.

Радиотелескоп БСА ФИАН работает на частоте 102,5 МГц в полосе 3% [139]. Он занимает площадь 73 тыс. м². На этой площади над плоским проволочным рефлектором установлены 16384 волновых вибратора (по 64 в 256 рядах). Каждый ряд ориентирован с востока на запад, и вибраторы коллинеарны с вибраторами ДКР-1000.

На рис. 1.36 приведена фотография антенного поля телескопа БСА ФИАН, а на рис. 1.37 — его структурная схема. При разработке инструмента ставилась задача найти простые в техническом отношении решения по элементам и системам, чтобы за счет уменьшения рабочей полосы до 3% обеспечить невысокую стоимость инструмента и сжатые сроки его создания.

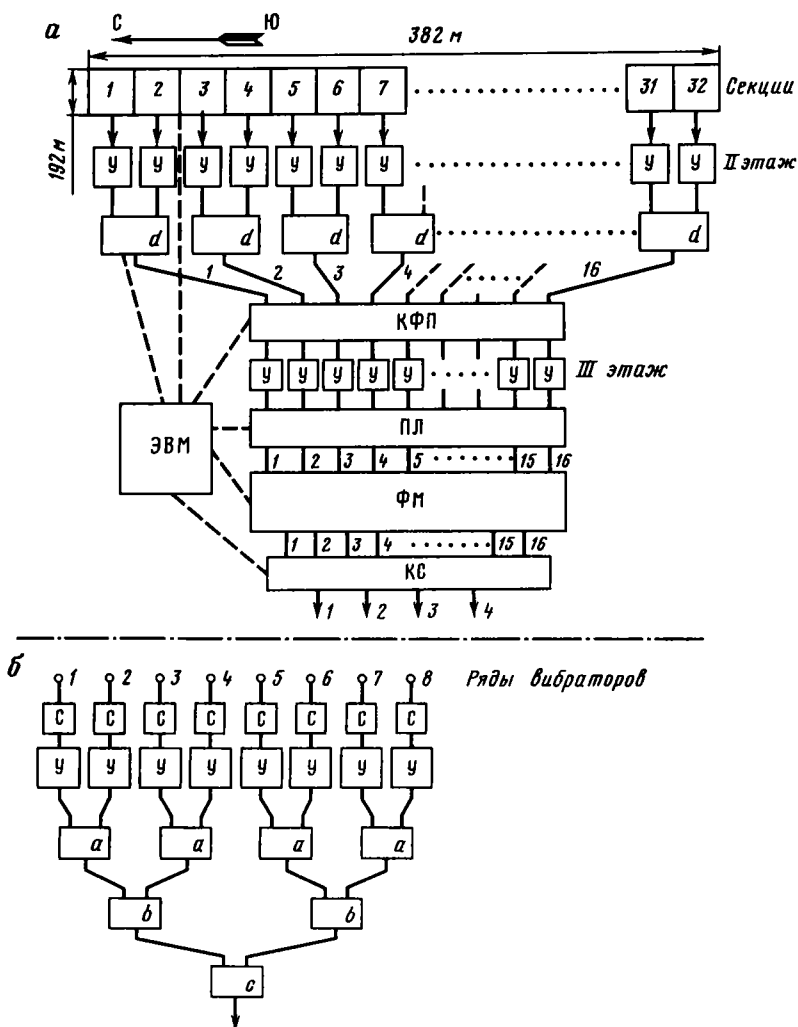


Рис. 1.37. Структурная схема радиотелескопа БСА ФИАН

а – радиотелескоп; б – секция; С – симметрирующее устройство; У – усилитель; а, ..., i – фазовращатели ФВ-2-5; КФП – коммутатор фазированных петель ФВ-16-3, переключатель электрической оси; ПЛ – переключатель луча ФВ-16-1; ФМ – фазированная матрица Батлера 16/16; КС – коммутатор строк

Как уже отмечалось, для БСА ФИАН использовались волновые вибраторы с длиной плеча 1,225 м из биметаллической проволоки диаметром 2 мм. Группа из 16 вибраторов собирается по параллельной схеме на двухпроводном фидере с волновым сопротивлением 468 Ом (затухание 2Нп/км) с расстоянием в длину волны между точками подключения. При этом обеспечивается синфазное возбуждение вибраторов в группе на центральной частоте при снижении первоначально высокого входного сопротивления одного вибратора в 16 раз. Четыре таких группы в ряду объединяются по много-

этажной схеме двухпроводным фидером с волновым сопротивлением 468 Ом (64 вибратора). Для согласования в точках суммирования многоэтажной схемы применены простые трансформаторы длиной 58 см с волновым сопротивлением 360 Ом и параллельные короткозамкнутые шлейфы. Вибраторы БСА установлены над проволочным экраном на высоте 0,63 м ($0,215\lambda$). Сам экран поднят над землей так, что в самой нижней точке расстояние до земли остается порядка 1,7 м. Между экраном и землей смонтирована вся двухпроводная фидерная система, что помогло повысить помехоустойчивость антенны. Были приняты дополнительные меры при симметрировании фидеров. Коэффициент полезного действия фидерного тракта одного ряда, полная длина которого около 200 м, достаточно высок и составляет порядка 0,64. При отклонении от центральной частоты 102,5 МГц ухудшается фазировка в группе вибраторов, сигнал от которых в центре собирающего фидера группы, и растет рассогласование в полосе. На краях рабочей полосы частот ($0,015f_0$) ухудшение КПД из-за рассогласования не более 10% (коэффициент отражения около 0,3). В центре каждого ряда установлено стандартное симметрирующее устройство. С его помощью входное сопротивление 234 Ом трансформируется к сопротивлению тракта 75 Ом [139].

Всего в антенной решетке БСА ФИАН 256 рядов вибраторов (по 64 вибратора в ряду), установленных через 1,5 м. Плоскость раскрыва наклонена на $29'$ к востоку (как у антенны В-3 ДКР-1000) и на $21'$ к северу (как у антенны С-Ю ДКР-1000). Само антенное полотно установлено в юго-западном квадранте радиотелескопа ДКР-1000, и для крепления несущих тросов БСА частично используются конструкции южного плеча ДКР-1000.

Фазирование антенной решетки БСА проводится по одной координате (по углу места). Для этого в антенне установлены фазовращатели дискретного типа, идентичные тем, что использованы в антенне С-Ю ДКР-1000. Вся антенная решетка из 256 рядов разделена на секции по восемь рядов в каждой. На рис. 1,37,б приведена схема секции. После суммирующих устройств (С) и антенных усилителей I этажа усиления установлены фазовращатели ФВ-2-5 в трех этажах схемы. Соединительные кабели от рядов и между фазовращателями сделаны так, что первоначально секция сфазирована на зенитное расстояние 14° . В фазовращателях первых двух этажей короткие задержки (минимальная величина 7,5 см) выполнены в виде полосковых линий на печатных платах, где установлены реле, коммутирующие фазовые задержки. Четырехразрядные фазовращатели с квадрантным переключателем (пятый разряд) обеспечивают 31 положение диаграммы направленности каждой секции с шагом $2,8^\circ \text{secc}$. При ширине диаграммы секции около $7,5^\circ$ получается достаточно высокий уровень пересечения при смежных положениях диаграмм (не ниже 0,88). Эффективность работы схемы фазирования секции высокая. Коэффициент полезного действия схемы равен 0,68 при синфазном положении системы и 0,6 при максимальном отклонении диаграммы от синфазного положения. После дополнительного усиления сигнала во II этаже антенных усилителей секции еще попарно фазировются фазовращателями ФВ-2-5 (d на рис. 1.37,а). Таких фазовращателей в антенне БСА 16 шт. На их выходах получаются сигналы от 16 частей — полотен антенной решетки, при этом фазирование

выполняется с компенсацией времени запаздывания при наклонном падении волнового фронта на раскрыв решетки (временной способ).

Сигналы от этих полотен БСА подводятся в здание на северном краю (ближе всего к центру ДКР-1000) по 16 магистральным кабелям, проложенным в надземной галерее длиной около 400 м. Как показали измерения, проведенные в различные сезоны, фазовые разбросы трактов не превышали 10° . В галерее размещены также все фазовращатели, антенные усилители, блоки питания и элементы систем управления и контроля.

Электрическая длина магистральных кабелей нарастает к полотнам более высоких номеров (к югу) на 5,86 м для начального фазирования всей решетки на зенитное расстояние 14° . Кабели от ближних к зданию полотен антенны уложены петлями по галерее. Самый протяженный кабель длиной 389 м проложен к 16-й секции на южном краю антенной решетки. Хотя использован кабель с малым погонным затуханием, все-таки полный КПД магистральной системы составил 0,21, и эти потери необходимо было компенсировать системой антенных предусилителей.

Формирование 16-лучевой диаграммы направленности всей антенной решетки БСА проводится с помощью фазирющей матрицы Батлера [27] (ФМ на рис. 1.37, а), выполненной на гибридных кольцах по обычной схеме с шагом фазового сдвига $22,5^\circ$. Выбор требуемого направления приема осуществляется установкой диаграммы направленности всех 16 полотен одновременно по комбинации разрядов фазовращателей с шагом через $2,8^\circ$ и выбором нужного номера луча (выхода) с фазирющей матрицы с шагом $27'$ с помощью коммутатора строк (КС). Одновременно можно вести наблюдения по восьми смежным направлениям без значительных потерь чувствительности. Уровень пересечения смежных лучей фазиремой антенной решетки, где установлена матрица Батлера, составляет порядка 0,5 по мощности. Чтобы избежать заметного снижения чувствительности при приеме с этих направлений, приходящихся на пересечения, в антенне БСА применен фазовращатель ФВ-16-2 (ПЛ на рис. 1.37, а), с помощью которого в магистральные кабели вводится фазовый сдвиг, линейно увеличивающийся с номером тракта с шагом $11,25^\circ$, по включению которого весь набор из 16 лучей из основного положения сдвигается на $13,1'$ секз в новое дополнительное, т.е. на полширины диаграммы направленности антенны. Теперь уровень пересечения "основного" и дополнительного смежных лучей будет около 0,82. Наблюдения проводятся с основной или с дополнительной многолучевой диаграммой направленности. Тем самым сводят к минимуму потери чувствительности радиотелескопа при дискретной смене направления приема.

Как известно, при больших отклонениях положения максимума диаграммы направленности от нормали к решетке с формирующей многолучевую диаграмму направленности матрицей, в которой использованы фазовые, а не временные задержки, появляется зависимость этого положения от частоты. Это сужает рабочую полосу антенны. В антенной системе БСА используется фазовращатель ФВ-16-3 (КФП, см. рис. 1.37, а), с помощью которого в магистральные кабели включаются дополнительные большие отрезки кабеля (фазирующие петли) с шагом 11,707 м на каждый номер кабеля. С помощью этого фазовращателя положение главного максимума диаграммы антенны (дифракционного лепестка множителя решетки

из 16 полотен) устанавливается на зенитные расстояния 14,09; 14,14 и 47,07°. При этом КПД фазовращателя ФВ-16-3 во включенном состоянии составляет 0,67.

Для компенсации потерь в фазизирующих системах и трактах радиотелескопа БСА ФИАН, как уже отмечалось, установлено три этапа антенных предусилителей [141]. В I этаже — 256 усилителей. Они выполнены на полевых транзисторах КП305 с фактором шума около 1,6 и коэффициентом усиления 15 дБ. Во II этаже — 32 усилителя с фактором шума порядка 2 и усилением 26 дБ. В этих усилителях установлены узкополосные фильтры для борьбы с помехами. В III этаже — 16 усилителей. Высокая линейность амплитудных характеристик усилителей и эффективная фильтрация помогают в борьбе с помехами, которые при невысоком расположении системы над землей и благодаря принятым мерам при установке фидеров обеспечили ей высокую помехозащищенность. Наблюдения на радиотелескопе ведутся практически круглосуточно. Процент испорченных помехами данных наблюдений незначителен.

Радиотелескоп БСА ФИАН отличается простота конструкций, что обеспечило его невысокую стоимость и короткие сроки создания. Как показали исследования, у БСА ФИАН зависимость эффективной площади от угла наклона диаграмм от нормали к раскрытию невелика (кроме обычной косинусной), что объясняется "умеренным" изменением полного сопротивления волнового вибратора при сканировании в двумерной решетке.

Управление антенными системами БСА ФИАН автоматизировано с помощью ЭВМ М-6000 [142], что позволяет вести длительные наблюдения, перебрасывая за доли секунды направление приема по углу места на различные объекты без вмешательства оператора, по команде ЭВМ. Ниже приведены основные параметры радиотелескопа БСА ФИАН.

Рабочая частота	102,5 МГц
Геометрическая площадь	73 000 м ²
Диаграмма направленности	1° × 0,5°
Чувствительность по потоку (в зените) ($\Delta f = 500$ кГц, $\tau = 1$ с, $c/\text{ш} = 3$)	0,5 Ян
Чувствительность, определяемая эффектом "путаницы" ($c/\text{ш} = 3$)	— 1,5 Ян
Эффективная площадь (в зените)	32 · 10 ³ м ²
Сектор сканирования по склонению (16 одновременных лучей с расстоянием 26,2' между смежными лучами)	от 90 до —15°
Шаг перестановки лучей диаграммы	13,1'

Радиотелескоп БСА ФИАН является современным высокочувствительным инструментом. Его большая эффективность в работе определяется быстрой (за доли секунды) переустановкой направления приема по программе от ЭВМ и хорошей помехоустойчивостью, которая обеспечивается фильтрами на входах усилителей и низким расположением антенны над землей.

Этот инструмент эффективно используется наблюдателями многих организаций СССР. На нем успешно проведены наблюдения и по ряду международных программ. На радиотелескопе БСА ФИАН проведен обзор пульсаров северной полусферы неба, по результатам которого составлен

каталог профилей импульсов и потоков пульсаров на волне 3 м. Совместно с Манчестерским университетом (Англия, обсерватория Джодрелл-Бэнк) и институтом Макса Планка (ФРГ, обсерватория в Эффельсберге) исследовались спектры радиоизлучения и формы импульсов пульсаров при синхронизированных во времени наблюдениях пульсаров. На БСА ФИАН по оригинальной методике с использованием ионосферы как "вращателя поляризации" измерена степень поляризованности радиоизлучения пульсаров на метровых волнах. По наблюдениям большого числа мерцающих источников построены "карты" распределения неоднородной околосолнечной плазмы. Выполненные обзоры галактических источников дали возможность обнаружить много новых компактных галактических объектов [9].

Радиотелескопы Советского Союза, созданные за годы интенсивного развития экспериментальной базы наблюдательной радиоастрономии, уникальны по параметрам среди инструментов своего класса. Построенные в результате труда больших коллективов, эти инструменты дали советским ученым возможность вести исследования по самым различным астрономическим задачам. Отечественные инструменты эффективно использовались и зарубежными специалистами в совместных с советскими учеными программах.

Дальнейшее развитие радиотелескопов необходимо вести по пути создания многоэлементных систем апертурного синтеза и РСДБ-сетей. Весьма перспективны проекты создания крупных инструментов зеркального типа для диапазона коротких миллиметровых и субмиллиметровых волн, а также интерференционных многоэлементных систем этого диапазона. И наконец, вывод радиотелескопов в космическое пространство и объединение их с наземными сетями явятся новым качественным шагом на пути увеличения разрешающей способности.

В заключение авторы главы приносят искреннюю благодарность А.А. Пистолькорсу за ценные советы и замечания, а также П.М. Геруни, П.Д. Калачеву, А.Г. Кислякову, А.Н. Козлову, Б.А. Попереченко, Б.А. Розанову, Г.Я. Смолькову за большую помощь и предоставление исходных материалов главы. Авторы признательны также Ю.М. Попову за большую работу по подготовке иллюстраций к главе.

РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ СО СВЕРХДЛИННЫМИ БАЗАМИ

Введение

Развитие радиоастрономии, как и астрономии в целом, непосредственно связано с совершенствованием телескопов — повышением их чувствительности и углового разрешения. Именно эти два параметра определяют возможность “увидеть” объект и получить его изображение. Мы судим о природе объекта по его собственному электромагнитному излучению. А для этого нужны максимально точные его изображения.

Разрешающая способность инструмента определяется его апертурой — геометрическими размерами, выраженными в длинах волн. Радиоволны в сотни тысяч раз длиннее оптических, поэтому разрешение даже самых совершенных радиотелескопов, размеры зеркал которых достигают десятки метров, не превышает разрешения невооруженного глаза. Чтобы изменить имевшееся положение, радиоастрономы уже с первых шагов стали опираться на интерференционные методы, в основу которых лег принцип интерферометра Майкельсона. Инструменты этого типа включают антенны относительно небольшого размера, но разнесенные на большое расстояние друг от друга и соединенные с приемником линиями связи. К ним относятся так называемый морской интерферометр (аналог зеркала Ллойда), в котором роль второй антенны играет зеркальное отражение антенны, установленной на высоком берегу у моря. Угловое разрешение интерферометра определяется не размерами антенн, а расстоянием между ними, что существенно упрощает решение вопроса о повышении разрешающей способности. Создание радиоинтерферометров для астрономических исследований связано с именами Дж. Болтона, Г. Стенли, Л. Мак-Криди, Дж. Пози, М. Райла, Г. Смита, а у нас в стране с именами С.Э. Хайкина, В.В. Виткевича и других [1].

Развитие радиоинтерферометрии позволило создать инструменты, угловое разрешение которых не только достигло разрешающей способности лучших оптических телескопов, но и превзошло его. Принципиально новым шагом явилась разработка радиоинтерферометра со сверхдлинной базой (РСДБ) или интерферометра с “независимой” регистрацией сигналов. Радиоинтерферометры со сверхдлинными базами позволяют исследовать космические объекты исключительно малых угловых размеров: облака релятивистских частиц, выбрасываемых из ядер квазаров, тонкую структуру областей образования звезд и планетных систем. Разрешающая способность глобальной радиоинтерференционной сети на три порядка превышает разрешение лучших оптических телескопов. Вывод одного из элементов интерферометра на орбиту вокруг Земли открывает широкие перспективы в исследовании астрономических объектов — угловое разрешение существенно возрастает и приближается к пределу, определяемому чувствительностью либо рассеянием на неоднородностях межзвездной среды. В этой главе рассмотрены основные направления развития РСДБ у нас в стране. Напомним вначале основы радиоинтерферометрии.

2.1. Принцип действия радиоинтерферометра

Простейший радиоинтерферометр состоит из двух антенн, разнесенных на расстояние B друг относительно друга (рис. 2.1). Сигналы от источника радиоизлучения на длине волны λ принимаются этими антеннами, усиливаются и передаются по высокочастотным кабелям к приемному устройству. Здесь сигналы суммируются, детектируются и регистрируются на самописце. При вращении Земли меняется положение источника относительно базы,

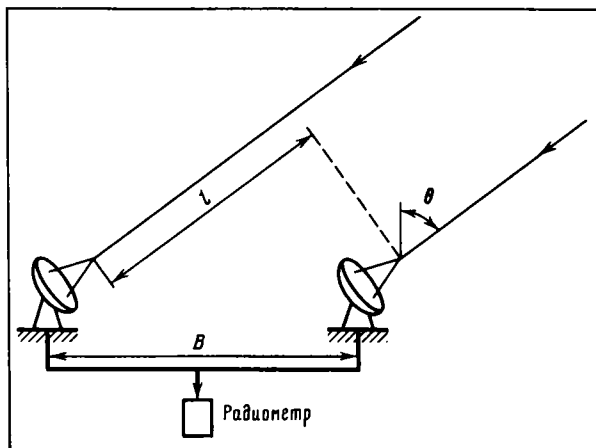


Рис. 2.1. Принципиальная схема радиоинтерферометра

что изменяет относительное запаздывание сигналов $l = B \sin \theta$, а соответственно и разность фаз принимаемых сигналов $\varphi = 2\pi l/\lambda$. Сигналы интерферируют между собой и при определенном значении θ оказываются с точностью до 2π то в фазе — сигнал достигает максимума, то в противофазе — наблюдается минимум сигнала. Таким образом, при прохождении источника через диаграмму направленности интерферометра появляются интерференционные лепестки, которые соответствуют многолепестковой диаграмме направленности интерферометра. Ширина интерференционного лепестка равна $\varphi_{\pi} = \lambda/(B \cos \theta)$. Хотя интерферометр имеет высокое угловое разрешение, в действительности, он не "видит" изображения объекта в целом. Он откликается лишь на одну из гармоник этого изображения, а именно на ту, на которую он настроен. Настройка определяется длиной базы и ее ориентацией $F = (B \cos \theta)/\lambda$. Изображения объекта $T_{\pi}(x, y)$, где x и y — координаты на небесной сфере, может быть разложено на отдельные пространственные гармоники. Математически это соответствует преобразованию Фурье от T_{π} , т.е.

$$A(u, v) \sim \int T_{\pi}(x, y) \exp [j2\pi (xu + yv)] dx dy.$$

Таким образом, с помощью радиоинтерферометра, проводя наблюдения исследуемого источника с базами разной длины и ориентации, можно получить все гармоники изображения — фурье-образ объекта $A(u, v)$, а затем, суммируя эти гармоники с учетом их фаз (обратное преобразование Фурье),

построить само изображение

$$T_{\pi}(x, y) \sim \int A(u, v) \exp[-j2\pi(xu + yv)] du dv.$$

В простейшем случае, когда возможности измерений ограничены, например при наблюдениях на радиоинтерферометре с одной базой, распределение яркости источника предполагается гауссовым и по одной гармонике определяют его угловой размер.

Измерение спектра пространственных частот с помощью интерферометра с базой переменной длины и ориентации эквивалентно наблюдениям на антенне с большой апертурой. Одна из антенн интерферометра последовательно перемещается в пределах этой апертуры и таким образом позволяет синтезировать антенну с большой апертурой. Аналогично этому можно сказать, что последовательные наблюдения радиоисточника на радиоинтерферометрах с базами разной длины и ориентации позволяют синтезировать изображение объекта. Детальный анализ и практическая реализация метода апертурного синтеза были проведены М. Райлом (см. [2]). Чем компактнее источник, тем шире спектр пространственных частот его изображения, тем большие базы необходимы для его исследования. Эти вопросы уже рассматривались в гл. 1.

2.2. Технические реализации радиоинтерферометров

Радиоинтерферометры морского типа и в виде двух антенн, соединенных высокочастотным кабелем, были созданы на Крымской радиоастрономической станции ФИАНе в начале 50-х годов [1]. Они работали в диапазоне дециметровых и метровых длин волн. Длины баз были ограничены потерями в высокочастотных кабелях. На дециметровых волнах базы не превышали 100 м, а на метровых — 1 км. Чтобы ослабить влияние фоновое излучения и собственных шумов аппаратуры, которые существенно превышали уровни сигналов от радиоисточников, вводилась фазовая модуляция: в одно из плеч интерферометра периодически включался отрезок кабеля длиной $\lambda/2$. Такое включение приводит к скачку интерференционной диаграммы на половину лепестка. Минимум переходит в максимум и наоборот. Переключение осуществлялось с помощью реле, поэтому частота переключения не превышала нескольких десятков герц. На дециметровых волнах использовались более сложные системы модуляции. С появлением полупроводниковых диодных переключателей их стали использовать в модуляторах. Фазовая модуляция позволяла выделить интерференционную часть сигнала и, что не менее важно, усилить синхронно промодулированный сигнал, расширить таким образом динамический диапазон квадратичного детектора и существенно снизить влияние помех. Повышалась и стабильность работы радиометра за счет перехода от компенсационного к модуляционному методу приема сигналов (см., например, [3]).

Создание высокочастотных малошумящих радиоламп позволило разработать усилители высокочастотных сигналов на метровых волнах и устанавливать их непосредственно на антеннах. Это снизило требования к потерям в высокочастотном кабеле и позволило увеличить длины баз до нескольких километров.

Первоначально основные научные задачи Крымской радиоастрономической

кой станции ФИАН были связаны с исследованиями Солнца. На дециметровых волнах с помощью радиоинтерферометра с базой переменной длины было получено распределение яркости спокойного Солнца, его нижней короны. На метровых волнах исследовалась корона и свёрхкорона. При этом Виткевичем был применен оригинальный метод просвечивания [4]. Ежегодно Солнце проходит по небесной сфере вблизи мощного источника космического радиоизлучения — Крабовидной туманности. При наблюдении ее радиоизлучения, проходящего через корону, оказывалось, что изображение туманности искажается. Эти искажения непосредственно связаны с особенностями структуры солнечной короны. Подробно об этом открытии рассказано в гл. 5. Для изучения Солнца были созданы радиоинтерферометры, чувствительные к излучению Крабовидной туманности, но нечувствительные к излучению спокойного Солнца. Длины баз были подобраны таким образом, чтобы ширины интерференционных лепестков были больше угловых размеров туманности, но существенно меньше размеров Солнца. На метровых радиоволнах диаметр Солнца (его короны) составляет $\sim 1^\circ$, а размер Крабовидной туманности $\sim 5'$. Чтобы измерить форму туманности и проследить ее изменение во время покрытия ее Солнцем, были построены три радиоинтерферометра с базами, ориентированными в разных направлениях. В дальнейшем был создан радиоинтерференционный треугольник из двух 30-метровых антенн, разнесенных в направлении восток–запад на 500 м, и антенной решетки из элементов типа “двойной квадрат” к северу от них [1].

Опыт, накопленный ФИАНом в области радиоинтерферометрии, позволил в 1959 г. в кратчайшие сроки создать радиоинтерферометр на длину волн 1,7 м и провести измерения траектории движения космических ракет, направленных в сторону Луны. Место прилунения контейнера показано на рис. 2.2 [5]. Это был первый опыт по использованию радиоастрономических интерферометров для решения навигационных задач в космосе. Необходимо отметить, что, в свою очередь, этот опыт помог в радиоастрономических исследованиях Солнца при определении траекторий движения ярких образований. Было установлено, что это выбросы горячей плазмы, движущиеся с большими скоростями. Порой скорости превышали вторую параболическую и облака горячей плазмы покидали Солнце и уходили в межпланетное пространство [6]. На рис. 2.3 показан один из таких случаев. Опыт, накопленный во время траекторных измерений лунников, лег в основу создания радиоинтерферометров ЦДКС. Впервые на этих антеннах были применены малощумящие квантовые парамагнитные усилители [7].

В ходе развития радиоастрономии требовались все большие и большие угловые разрешения. Создавались радиоинтерферометры с ретрансляцией сигналов, увеличивались длины баз. При этом возникала новая трудность, связанная с необходимостью компенсировать значительные относительные запаздывания сигналов τ . Как известно, в радиоастрономии для повышения чувствительности измерений максимально возможно расширяется полоса принимаемого сигнала Δf . Но расширение полосы приема сигнала ограничивает “поле зрения” инструмента — количество видимых радиоинтерференционных лепестков. Можно показать, что их число равно $n = f/\Delta f$, где f — частота принимаемого сигнала. Чтобы “увидеть” интерференционные лепестки — попасть в зону корреляции — необходимо компенсировать относи-

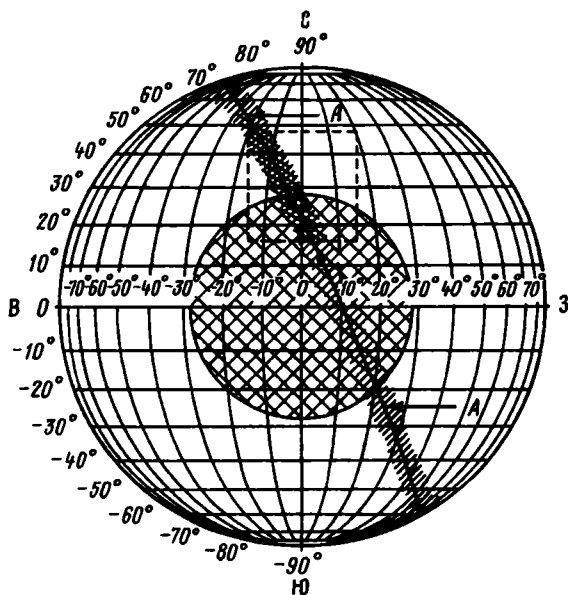


Рис. 2.2. Место прилунения контейнера лунника

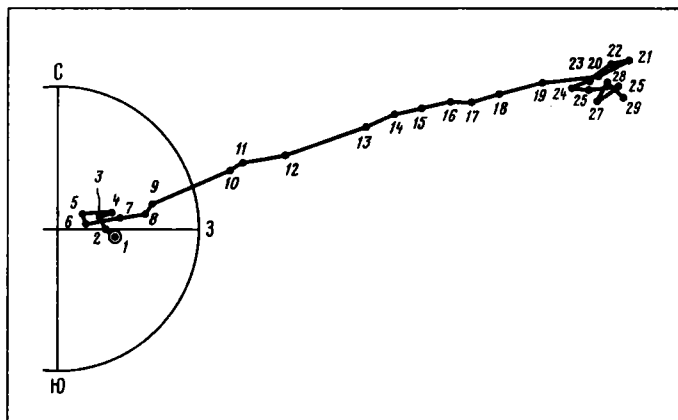


Рис. 2.3. Траектория движения стутка плазмы, выброшенного с солнечной поверхности 24.06.60 г.

тельное запаздывание сигналов τ . Но чем больше длина базы, тем больше относительное запаздывание. Если на базах небольшой длины достаточно для компенсации в одно из плеч интерферометра включить соответствующей длины отрезок кабеля, то на больших базах приходится создавать сложные ультразвуковые линии задержки.

Для ускорения процесса синтезирования изображения объекта увеличивают число элементов интерферометра. т.е. создают многоэлементный инст-

румент — антенную решетку, чувствительную к определенному спектру пространственных частот [8]. К инструментам этого типа относятся крестообразный радиотелескоп ФИАН, описанный в гл.1, Т-образный инструмент РИАН УССР (УТР-2), а также большая решетка в Сокорро (США) [9].

Для расширения спектра пространственных частот интерферометра исследуемый источник наблюдают в пределах всей его видимости над горизонтом при разных проекциях баз на небесную сферу. При движении источника по небесной сфере меняется его положение относительно базы, а также позиционный угол, а соответственно и регистрируемые гармоники изображения объекта. Проекция вектора базы на небесную сферу описывает эллипс, соответствующий спектру пространственных частот данного интерферометра.

Современные радиоинтерферометры представляют собой сложные антенные системы, снабженные вычислительными комплексами, обладающими широким полем зрения и угловым разрешением, достигающим разрешения лучших оптических телескопов, а порой и превосходящих их. Например, радиоинтерферометр в Сокорро на длине волны 1,35 см имеет разрешающую способность 0,05", а интерферометр "Мерлин" в Англии, состоящий из шести антенн, разнесенных на 134 км, — 0,1" [9, 10]. Дальнейшее совершенствование радиоинтерферометрии, стремление повысить угловое разрешение привели к принципиально новому решению — созданию радиоинтерферометров со сверхдлинными базами [11]. Именно этим системам посвящено дальнейшее изложение.

2.3. Радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами.

История возникновения и развития

Как отмечалось выше, основным ограничением для повышения углового разрешения интерферометра является необходимость передачи высокочастотных сигналов на большое расстояние без потери когерентности, а также компенсации относительного запаздывания сигналов. Следует отметить, что попытки решить эти проблемы делались и раньше. Х. Браун предложил так называемый интерферометр интенсивности. В отличие от интерферометра Майкельсона в нем определяется корреляция не самих высокочастотных сигналов, а их огибающих, т.е. корреляция интенсивностей сигналов [12]. Сигналы, принятые антеннами, усиливаются, детектируются непосредственно на каждой из антенн и передаются на центр обработки по обычным телефонным линиям связи. Полоса передаваемого сигнала при этом может составлять всего лишь несколько десятков килогерц. Однако этот метод обладает одним существенным недостатком — низкой чувствительностью. Отношение сигнал/шум в интерферометре интенсивности снижается как квадрат отношения сигнал/шум интерферометра Майкельсона. Если учесть, что отношение сигнал/шум в радиоастрономии меньше единицы, то становится очевидным ограничение применения интерферометра интенсивности для большинства объектов исследования.

Развитие квантовой радиофизики создало предпосылки для решения проблемы когерентного преобразования сигналов непосредственно на каждой из антенн с помощью независимых высокостабильных атомных стандартов частоты. Регистрация сигналов на магнитную ленту и синхронизация

их считывания с сигналами, поступающими от атомных стандартов частоты, решили проблему передачи на большие расстояния. Упрощена также возможность компенсации относительной задержки принимаемых сигналов от радиоисточника. Для этого достаточно ввести соответствующую задержку при считывании сигналов с магнитофона. Современные атомные стандарты частоты водородного типа имеют стабильность частоты 10^{-14} , а в особых случаях даже более высокую. Это обеспечивает сохранение фаз преобразованных высокочастотных сигналов на волне 1 см с погрешностью в пределах 90° в течение 1000 с и больше. Эти же генераторы позволяют синхронизовать записи на пунктах приема сигналов с погрешностью порядка единиц наносекунд. Как упоминалось ранее, для обеспечения высокой чувствительности измерений необходимо иметь широкую полосу регистрации сигналов. Современные видеомагнитофоны позволяют регистрировать сигналы в полосе, равной 2 МГц, а специального типа — даже до 112 МГц. Таким образом, была решена проблема "независимого" приема сигналов на далеко разнесенных антеннах, их регистрации на магнитофонах и последующей обработки на спецпроцессоре. На вычислительном центре зарегистрированные сигналы считываются с магнитных лент с соответствующей задержкой одного из них и перемножаются между собой, коррелированный сигнал после усреднения выделяется, он и соответствует интерференционному сигналу. Весь процесс обработки контролирует ЭВМ, которая вводит соответствующие задержки сигналов и компенсирует доплеровские сдвиги. В результате получают коррелированные потоки источника, соответствующие амплитуде гармоник пространственных частот изображения. Таким образом, антенны интерферометра оказываются независимыми друг от друга, на каждой из них одновременно проводят наблюдения исследуемого объекта, а записи отправляют на вычислительный центр. Расстояние между антеннами может быть сделано сколь угодно большим, а следовательно, угловое разрешение сколь угодно высоким.

Возникновение метода РСДБ было связано с развитием радиоастрономических исследований на ЦДКС в Евпатории. В начале 60-х годов здесь проводились наблюдения ФИАНом совместно с ГАИШ источников космического радиоизлучения с пекулярными спектрами. Их спектры имели загадочные высокочастотные избытки. Как оказалось в дальнейшем, это были квазары — объекты с активными ядрами [13–15]. Центр имел все необходимые компоненты для РСДБ — атомные стандарты частоты аммиачного типа, магнитофоны с полосой регистрации сигналов, равной 100 кГц, и крупные антенны, разнесенные на несколько десятков километров друг от друга. Были начаты работы по реализации новой идеи. Естественно, имелись определенные технические трудности. Первое сообщение о радиоинтерферометре с большой базой было сделано Л.И. Матвеенко осенью 1962 г. на семинаре лаборатории радиоастрономии ФИАНа в Пушкино [1], а затем в ГАИШ.

Во время посещения ЦДКС Б. Ловеллом летом 1963 г. была рассмотрена возможность создания интерферометра Евпатория–Джодрелл-Бэнк на длину волны 32 см. Сразу же по возвращении в Англию Ловелл обсудил новое предложение и направил Г. Пальмера к нам для более детального рассмотрения и подготовки эксперимента [16].

Первые эксперименты на сверхдлинных базах были проведены в 1967 г.

двумя независимыми группами радиоастрономов США и Канады [17, 18]. Канадская группа разработала аналоговую аппаратуру регистрации и для синхронизации записей использовала пилот-сигнал. Радиоастрономы США применили цифровую систему. Синхронизация записей в этом случае определяется положением самих импульсов, задаваемых от атомного стандарта частоты. Наблюдения проводились на дециметровых волнах и показали возможности метода РСДБ. Более того, стало ясным, что имеются компактные источники, для изучения которых необходимы базы существенно больших размеров, чем это возможно в пределах Северной Америки. В феврале 1968 г. в ФИАН обратились радиоастрономы США М. Коуэн из Калифорнийского технологического института и К. Келлерман из Национальной радиоастрономической обсерватории (НРАО) с предложением провести совместный эксперимент на радиоинтерферометре с межконтинентальной базой между РТ-22 ФИАН и РТ-43 НРАО (Грин-Бэнк). После анализа условий проведения наблюдений на таком радиоинтерферометре было решено использовать радиотелескоп КрАО, расположенный в Крыму близ поселка Симеиз. К весне 1969 г. радиотелескоп был подготовлен к наблюдениям.

Для точной привязки времени на обоих радиотелескопах из США были доставлены работающие атомные часы. Кроме того, систематическая привязка времени осуществлялась по сигналам навигационной системы "Лоран С". Для этого была проведена специальная экспедиция по выбору места приема сигналов времени. Были подготовлены пункты приема сигналов в Пулковской обсерватории и Симеизе.

На РТ-22 была установлена аппаратура и подготовлены наблюдения на длине волны 6 см. Ранее на этой длине волны наблюдения проводились на континентальной базе и дали положительные результаты [19]. Регистрация сигналов осуществлялась на аппаратуре типа МК-1. Полоса сигнала составляла 360 кГц. В качестве опорного генератора использовался атомный стандарт частоты рубидиевого типа фирмы "Хьюлетт Паккард". После первого сеанса наблюдений магнитная лента была отправлена в НРАО для обработки контрольной записи. Были получены радиоинтерференционные лепестки. В октябре 1969 г. был проведен второй цикл измерений на длине волны 2,8 см. По окончании наблюдений атомные часы были возвращены в Грин-Бэнк для повторного сравнения и определения поправки времени в конце измерений. Обработка данных наблюдений проводилась на ЭВМ типа IBM 360/60 в НРАО и IBM 360/75 в Годдардовском космическом центре и Калифорнийском технологическом институте. Были получены радиоинтерференционные сигналы для всех источников на волне 6 см [19, 20]. На рис. 2.4 показан спектр интерференционного сигнала квазара 3С 273. На длине волны 2,8 см радиоинтерференционные лепестки удалось получить только для двух источников. На рис. 2.5 показана зависимость коэффициентов корреляции квазара 3С 273 от временной задержки.

Таким образом, была доказана возможность создания радиоинтерферометра с максимально возможной базой в условиях Земли на волнах сантиметрового диапазона. Угловое разрешение радиоинтерферометра Симеиз—Грин-Бэнк достигало предельного значения, равного долям миллисекунды дуги. Нужно отметить, что до получения этого результата рядом специалистов высказывалось мнение о невозможности реализации интерферо-

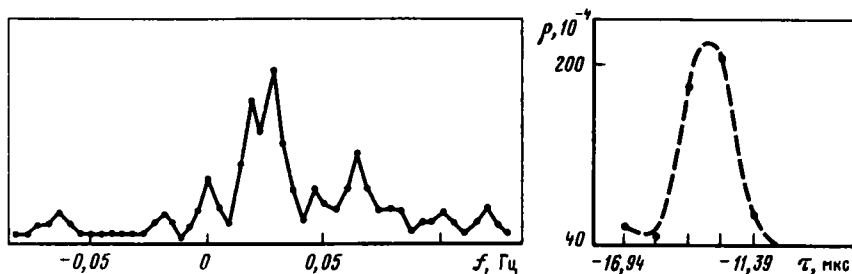


Рис. 2.4. Спектр радиоинтерференционного сигнала источника ЗС 273, полученный на длине волны 6 см на радиоинтерферометре Симеиз–Грин-Бэнк

Рис. 2.5. Зависимость коэффициента корреляции ρ сигналов от источника ЗС 273 на длине волны 2,8 см при разных временных задержках, полученных на радиоинтерферометре Симеиз–Грин-Бэнк ($F_{\text{инт}} = 0,229$ Гц)

метров с предельными базами в диапазоне сантиметровых длин волн из-за нестабильности атмосферы [21]. Нестабильность атмосферы должна была размыть интерференционную диаграмму. Демонстрация интерференционных сигналов, полученных на радиоинтерферометре Симеиз–Грин-Бэнк, на совещании в НИРФИ в начале 1970 г. убедила собравшихся в неточности наших представлений о модели атмосферы. Однако реальным ограничением углового разрешения была недостаточная стабильность рубидиевого стандарта частоты, которая ограничивала время когерентного накопления сигнала. На спектре интерференционного сигнала квазара ЗС 273 на длине волны 6 см расщепление линии связано со скачками частоты рубидиевого стандарта. Еще больше это отражалось на длине волны 2,8 см.

Проведенные исследования показали, что ядра квазаров и радиогалактик имеют сложную структуру, состоящую из нескольких компактных компонент. Было установлено, что яркостная температура отдельных компонент превышает ожидаемые величины. Отсюда следовало, что дальнейшие исследования необходимо проводить на радиоинтерферометрах с базами разной длины и ориентации. Необходимо было повысить как угловое разрешение, так и чувствительность.

В этот период времени в НИРФИ под руководством В.С. Троицкого разрабатываются теория и методы РСДБ для решения различного класса задач. Под руководством В.А. Алексеева была разработана первая отечественная аппаратура аналогового, а затем и цифрового типа на основе магнитофона ЭВМ с полосой регистрации около 80 кГц [22]. Первые испытания аппаратуры были проведены в августе–сентябре 1969 г. на элементах крестообразного радиотелескопа в Пушино. Расстояние между ними составляло примерно 500 м, длина волны – 3,5 м. Обработка данных наблюдений проводилась в НИРФИ на ЭВМ типа БЭСМ-2. Были получены коррелированные сигналы от источника Кассиопеи А и Крабовидной туманности. В мае 1970 г. эксперимент переносится на большую базу Пушино–Переславль. Длина базы достигала 230 км, а угловое разрешение (ширина интерференционного лепестка) – 3". Время записи источника составляло около 1,5 мин и определялось шириной диаграммы направленности

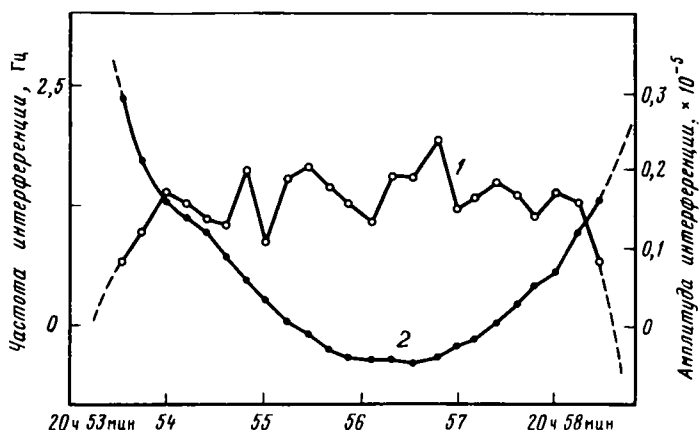


Рис. 2.6. Амплитуда (1) и частота (2) радиоинтерференционных сигналов, полученных на длине волны 3,55 см на радиоинтерферометре Сименз—Голдстоун 7.08.71 г. по источнику 3С 273

крестообразного радиотелескопа. Были определены коррелированные плотности потоков радиоизлучения квазаров 3С 298 и 3С 380 [23]. В 1971 г. в НИРФИ были продолжены наблюдения на самой низкой частоте, равной 9 МГц, на базах 1,5 и 7 км. Специально разработанная методика позволила снизить влияние ионосферы и измерить угловые размеры Кассиопеи А [24]. Дальнейшие наблюдения в декаметровом диапазоне проводятся на радиоинтерферометре Зименки—Граково, длина базы около 800 км. Были измерены значения коррелированных сигналов от компактного источника в Крабовидной туманности. В РИАН УССР под руководством С.Э. Брауде созданы на основе крупного радиотелескопа декаметровых волн УТР-2 и выносных пунктов близ Одессы и Харькова радиоинтерферометры на частоты 10–25 МГц [25].

Следующим шагом явились наблюдения на длине волны 75 см на радиоинтерферометре, образованном радиотелескопами БАО и РТ-22 КраО, удаленными друг относительно друга на 1100 км. Обработка данных наблюдений проводилась на вычислительном центре БАО на ЭВМ типа "Раздан". Были выделены компактные компоненты у квазаров 3С 147, 3С 273 и др. [26].

Продолжали успешно развиваться исследования тонкой структуры радиоисточников с предельным угловым разрешением. В 1970 г. наблюдения проводились на длинах волн 6 и 18 см одновременно на большом числе радиотелескопов [19] Австралии, СССР, США и Швеции. Подготавливались наблюдения и на более коротких волнах. К этому времени работы по РСДБ переводятся из ФИАНа во вновь созданный Институт космических исследований (ИКИ). Здесь создается специальная лаборатория для исследований с помощью РСДБ. Очередные исследования подготавливаются на волнах 3,55 и 1,35 см. В эксперименте на волне 3,55 см используется крупнейшая 64-метровая антенна Центра дальней космической связи в Голдстоуне (США). В качестве предусилителя применялся квантовый парамагнитный усилитель. В эксперименте участвовали также РТ-43

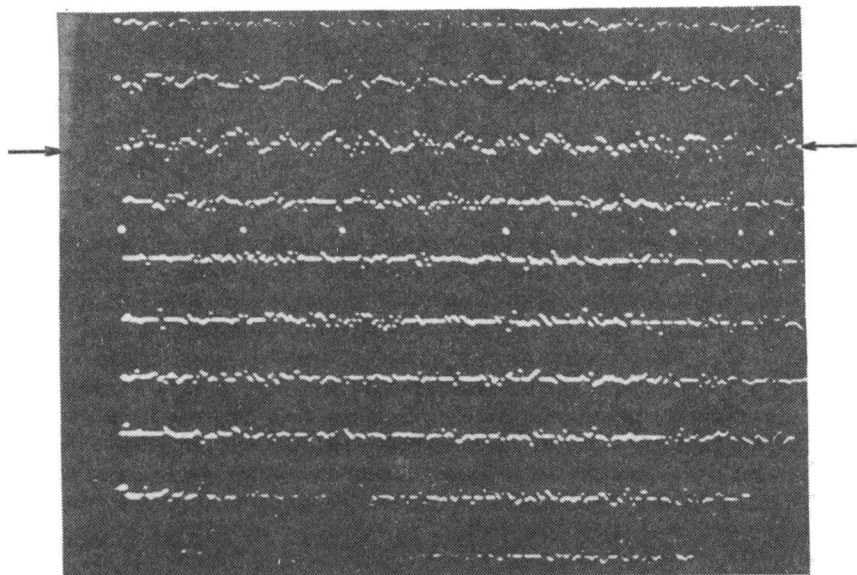


Рис. 2.7. Интерференционный сигнал на дисплее спецпроцессора от источника ЗС 273 (база Симеиз–Голдстоун, длина волны 6 см)

Стрелками показан канал, в котором видна интерференция

в Грин-Бэнк и РТ-22 в Симеизе. Для РТ-22 был изготовлен квантовый парамагнитный усилитель на волну 3,55 см [27]. Американские ученые завершили к этому времени разработку новой системы регистрации на основе видеоманитофона с полосой регистрации, равной 2 МГц [28]. Для повышения стабильности частоты гетеродина М. Коуэн применил высокостабильный кварцевый генератор, синхронизованный по фазе рубидиевым стандартом частоты [8]. Обработка данных наблюдений проводилась на спецпроцессоре в Грин-Бэнк. Широкие полосы регистрации сигналов требовали повышенной точности синхронизации записей и точного определения параметров баз. Необходимо было знать и точное положение радиоисточников. Для этого требовалось провести юстировку интерферометров. В качестве калибровочного источника был принят один из объектов исследования – квазар ЗС 273.

Строго говоря, для РСДБ не существует калибровочных источников в общепринятом понимании этого слова, так как для калибровки нужно знать точные координаты источника, а сам источник должен быть "точечным", что и является предметом исследования. Наблюдения исследуемых объектов на радиоинтерферометрах Симеиз–Грин-Бэнк–Голдстоун были проведены в июне 1971 г., и вскоре была начата обработка данных наблюдений. Первые интерференционные лепестки были получены на базе Симеиз–Голдстоун 7.08.1971 г. (рис. 2.6 и 2.7). Как показала дальнейшая обработка, один из источников ОЖ 287 имел компактную деталь, неразрешенную даже на базе Симеиз–Голдстоун, что позволило принять его в качестве калибровочного источника для определения амплитуд коррелированных потоков на разных базах. Этот компактный источник оказался облаком

релятивистских частиц, выброшенных из ядра квазара. Именно это облако и определило вспышку радиоизлучения [29]. В сейфертовской галактике 3С 120 была установлена видимая сверхсветовая скорость расширения и разлета компактных компонент. Как показали дальнейшие исследования, сверхсветовые скорости разлета компонент присущи объектам с активными ядрами. Это явление определяется геометрическим эффектом и конечной скоростью распространения света c . При движении источника со скоростью v в направлении θ , близком к направлению на наблюдателя, его видимая скорость движения в картинной плоскости будет равна

$$v_{\text{в}} = \frac{v \sin \theta}{1 - (v/c) \cos \theta} \approx \frac{v}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}.$$

Таким образом, скорость движения источника не превышает скорости света, но весьма близка к ней, что само по себе представляет одну из загадок объектов с активными ядрами. Для ее объяснения необходим эффективный механизм ускорения частиц, трансформирующий энергию ядра в энергию частиц. Второй загадкой оказалась необычайно высокая яркостная температура компонент. На начальной стадии яркостная температура выбросов может превышать $T_{\text{я}} > 10^{12}$ К. Как показали теоретические исследования, максимальная яркостная температура определяется комптоновскими потерями и равна $T_{\text{я}} = 10^{12}$ К. Превыщение этого предела может быть объяснено околосветовой скоростью движения облака частиц в направлении, близком к направлению на наблюдателя. При таких условиях излучение становится анизотропным: происходит его фокусировка в направлении движения [30].

В 1969 г. в ряде ничем не примечательных туманностей были обнаружены источники, излучающие узкие яркие линии на длинах волн 1,3 и 18 см. Природа их радиоизлучения была загадочна, и требовалось измерить их угловые размеры, чтобы определить яркостную температуру. Было решено провести наблюдения на континентальной, а затем и межконтинентальной базах. Большие плотности потоков радиоизлучения источников на длине волны 1,35 см позволяли провести измерения со сравнительно небольшими чувствительностями аппаратуры. Первые измерения дали положительный результат [31], и в июне 1971 г. по окончании наблюдений на длине волны 3,55 см на РТ-22 была установлена аппаратура на длину волны 1,35 см. Во время подготовки к наблюдениям в ночь с 5 на 6 июня было обнаружено быстрое нарастание излучения от объекта W49. Примерно за 5 мин сигнал вырос более чем в 10 раз. На рис. 2.8 показано изменение антенной температуры, а на рис. 2.9 — спектр источника, снятый с разрешением 100 кГц [32]. 8 июня наблюдения вспышки источника были проведены на радиоинтерферометре Симеиз—Хайстек с предельным угловым разрешением. Угловой размер области вспышки оказался равным 0,07–0,15 мс дуги, или 1–2 а.е., а яркостная температура $T_{\text{я}} \geq 10^{16}$ К. Высокая яркостная температура и малые размеры области излучения определяли мазерный механизм излучения и связь этого излучения с процессом звездообразования. Был исследован и ряд других объектов.

Исследования источников мазерного H_2O излучения были начаты и на радиоинтерферометре Симеиз—Пушино [33]. Для этого объединенными

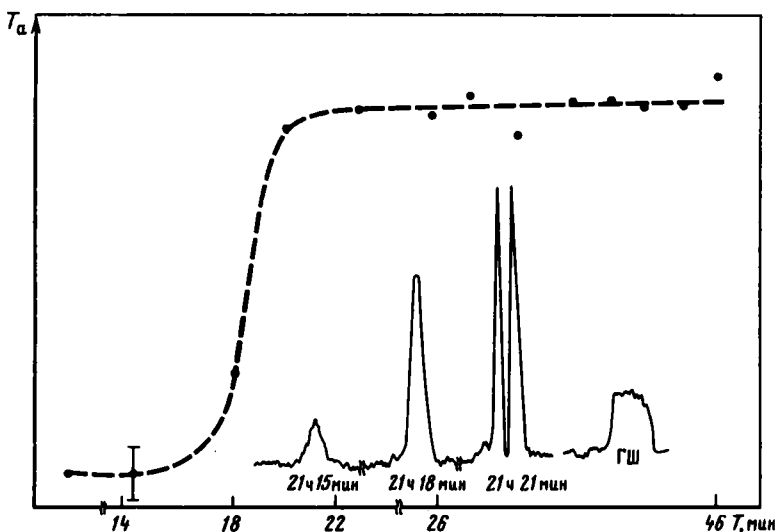


Рис. 2.8. Нарастание сигнала (штриховая) всплески мазерного излучения в объекте W49 ($\Delta f = 2$ МГц, $\lambda = 1,35$ см)

Здесь же показаны прохождения источника через диаграмму направленности антенны в соответствующие моменты времени, а также калибровка по сигналу шумового генератора

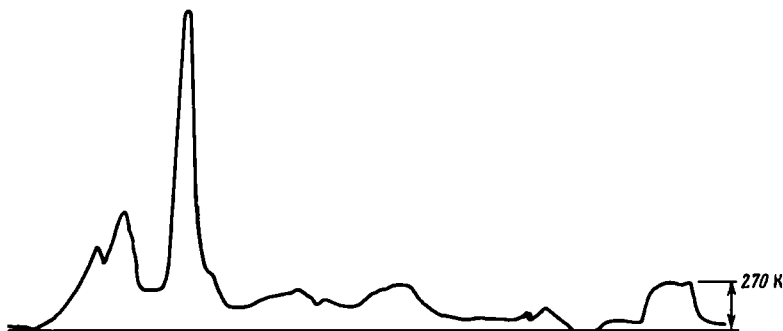


Рис. 2.9. Спектр всплески мазерного излучения

усилиями НИРФИ, ФИАН, БАО, КраО, ИРЭ и ИКИ была создана аппаратура и в декабре 1972 г. проведены наблюдения, которые позволили измерить угловые размеры отдельных источников и проследить происшедшие в них изменения. В качестве атомных стандартов частоты использовались генераторы рубидиевого типа.

В ИКИ для РСДБ-исследований на интерферометре Симеиз-Пушино была создана аппаратура на основе водородных стандартов частоты типа Ч1 44, система регистрации и обработки, сопрягаемая с вычислительной техникой типа РЯД с полосой регистрации 250 кГц [34]. Совместно с ФИАНом разрабатываются радиометры на длину волны 1,35 см с кванто-

выми парамагнитными усилителями [35]. Л.Р. Коганом было создано математическое обеспечение для обработки данных наблюдений как в непрерывном секторе, так и в линиях. Продолжаются исследования структуры мазерных источников в линиях водяного пара [36]. Радиотелескоп в Симеизе оснащают также радиометрами на длинах волн 18, 49 и 92 см, устанавливается более совершенный водородный стандарт частоты. Этот радиотелескоп включен в международную радиоинтерференционную сеть, и на нем регулярно проводятся наблюдения областей звездообразования и объектов с активными ядрами, изучается динамика и эволюция объектов [37–39]. В экспериментах участвуют радиотелескопы Австралии, Китая, Индии, Африки, ФРГ, Италии, Голландии, Швеции, Польши, США.

В настоящее время на РТ-22 КраО дополнительно установлены радиометры с малошумящими охлаждаемыми усилителями на длины волн 2,8 и 6 см, а также двухканальная система регистрации на видомагнитофонах типа "Марк-2". Аналогичная система регистрации установлена на РТ-22 ФИАН. В.И. Костенко и В.В. Тимофеев создали спецпроцессор и соответствующее математическое обеспечение для обработки данных наблюдений как в непрерывном, так и спектральном излучении [40]. С помощью этой системы проводятся наблюдения радиоисточников на длине волны 18 см на радиоинтерференционной сети, созданной на основе крупных отечественных радиотелескопов [41].

Все крупные радиотелескопы мира объединены в единую глобальную радиоинтерференционную сеть. В эту сеть входит и РТ-22 в Симеизе и Пушчино. Они оснащены водородными стандартами частоты и системами регистрации типа "Марк-2" с двумя каналами, что позволяет проводить как поляризационные измерения, так и синтезировать широкие полосы. На многих антеннах установлены также широкополосные системы регистрации типа "Марк-3", допускающие одновременную полосу регистрации сигнала до 56 МГц. Высокая стабильность водородных стандартов частоты и широкие полосы регистрации сигналов существенно повысили чувствительность и позволили проводить наблюдения на волнах миллиметрового диапазона [42]. Как показали наблюдения на миллиметровых волнах на континентальных и межконтинентальных базах, атмосфера существенно ограничивает время когерентного накопления сигнала. Для преодоления этого ограничения используется специальный метод замкнутых фаз и амплитуд, который частично снимает это ограничение [43]. Успешно проводятся исследования структуры радиоисточников и на метровых волнах. В этом случае видимые угловые размеры источников ограничиваются рассеянием на неоднородностях межзвездной среды [44].

Одновременные наблюдения на многих радиотелескопах существенно повышают информативность измерений. Как известно, $n(n-1)/2$ число без интерферометров. Наблюдения на базах разной длины позволяют измерить как крупномасштабную, так и мелкомасштабные структуры, а измерения на разных длинах волн — выделить "старые" долгоживущие компоненты — струи, гало или, наоборот, "молодые" только что выброшенные облака релятивистских частиц. Измерения на миллиметровых волнах делают доступными исследования наиболее глубоких слоев ядер, окруженных плотной ионизированной средой.

Радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами открыла новую стра-

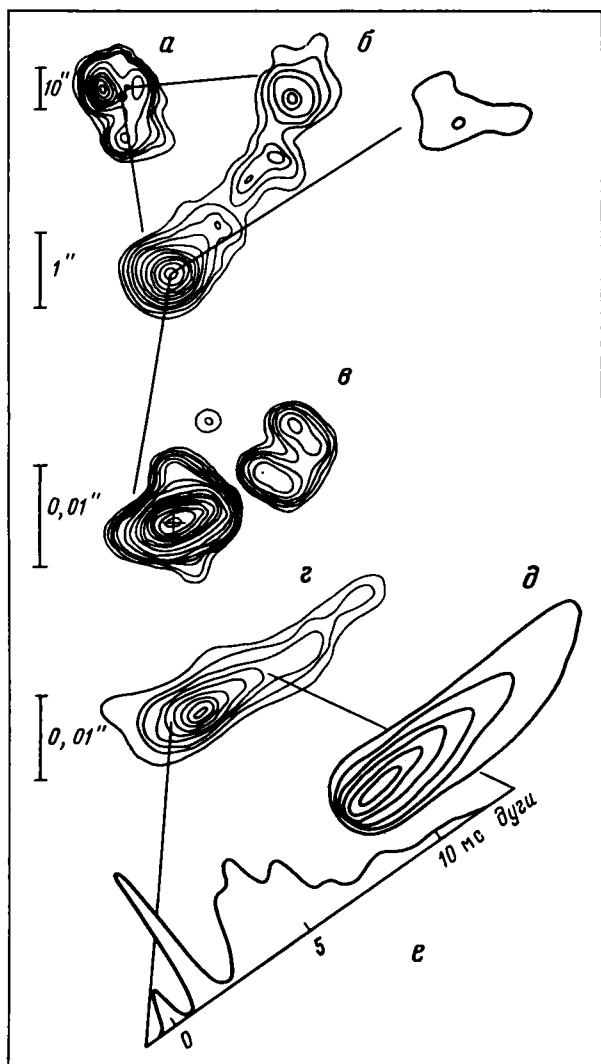


Рис. 2.10. Радиоизображения квазара 3C 345, полученные на разных волнах дециметрового диапазона

a — изображение квазара; $\lambda = 6$ см; *б* — структура выброса, $\lambda = 18$ см; *в* — тонкая структура выброса, $\lambda = 18$ см; *г* — тонкая структура основной части выброса, $\lambda = 18$ см; *д* — структура выброса; $\lambda = 49$ см; *е* — распределение яркости вдоль основной части выброса, $\lambda = 18$ см

ницу астрофизики. Угловое разрешение радиоинтерференционной сети на три порядка превышает разрешение лучших оптических телескопов. Достигнутые успехи являются результатом работы многих обсерваторий мира, результатом усилий многих энтузиастов, отдавших все силы на развитие этого направления. Мы не "видим" инструмент — глобальную радиоинтерференционную сеть. Мы не видим и сложнейшее математическое

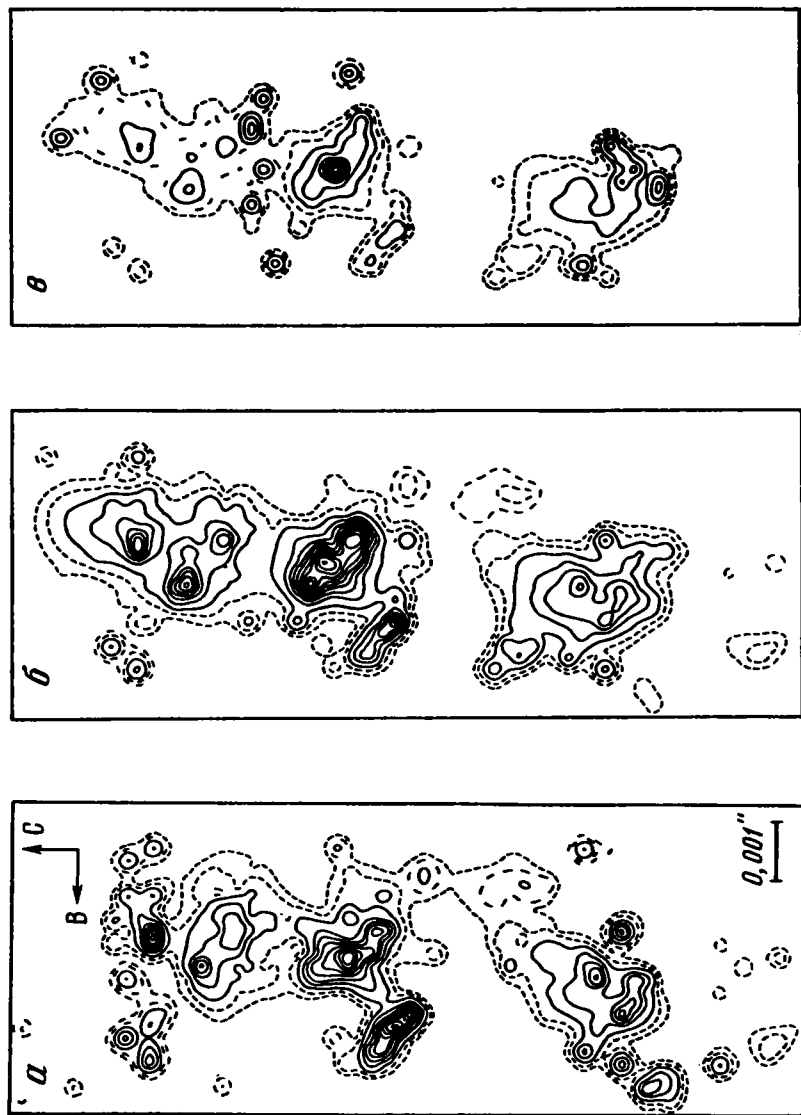


Рис. 2.11. Изображения сейфертовской галактики на длине волны 1,35 см, полученные с периодом около 1 года
a — $T_{\text{max}} = 0,88 \cdot 10^{12}$ К; *b* — $0,66 \cdot 10^{12}$ К; *v* — $1,5 \cdot 10^{12}$ К

обеспечение, синтезирующее искомое изображение из гигантского количества бит информации.

Изучение квазаров, радиогалактик и лацертид радиоинтерференционными методами показало, что это объекты одного класса — галактики, ядра которых находятся на разных этапах эволюции либо разных фазах активности. Активные процессы в ядрах сопровождаются выбросом больших масс релятивистской плазмы со скоростями, близкими к скорости света. Ядра окружены ионизованной средой, экранирующей от нас процессы, протекающие в их недрах. Но на миллиметровых и коротких сантиметровых волнах эта среда становится прозрачной. Одним из характерных объектов этого класса является квазар 3С 345. Из его ядра эпизодически выбрасываются облака релятивистской плазмы. Выбросы происходят в одном и том же направлении, определяемом положением оси вращения ядра. Движущиеся облака релятивистской плазмы возбуждают вокруг себя магнитное поле, которое сжимает их в тонкую струю — "джет". На больших расстояниях джет изгибается (рис. 2.10). Этот изгиб, вероятно, определяется процессией оси вращения ядра [45].

Необычным объектом оказался источник 3С 84 — сейфертовская галактика (рис. 2.11). Исследования на глобальной радиоинтерференционной сети на волне 1,35 см выявили двойную структуру системы [46]: два ядра и сопутствующие им компоненты. Положение компонент практически не меняется, но изменяется их яркость. В оптике наблюдаются двойные линии излучения, что соответствует наличию относительной скорости двух областей излучения, равной 600 км/с. Вероятно, эти области связаны с оболочками ядер. Расстояние между ними, как видно из рис. 2.11, равно 0,7 пк. Они должны быть гравитационно связаны между собой. В этом случае период обращения системы равен $\sim 10^4$ лет, а масса — $\sim 10^8 M_{\odot}$. Наблюдаемое распределение яркости определяется распределением магнитных полей — спиралями, плоскости которых параллельны лучу зрения [47].

Удивительная картина открылась при наблюдениях газопылевых комплексов. Оказалось, что в них сосредоточены активные области, излучающие узкие линии гидроксила и водяного пара. Количество зон доходит до 10, а их размеры достигают 1000 а.е. Скорости, соответствующие наиболее ярким линиям, лежат в пределах 10–15 км/с. Отдельные яркие источники имеют размеры ~ 1 а.е. и распределены в диске либо в кольце. На рис. 2.12 показано распределение компонент в объекте W3 OH. Масса центральной звезды равна $\sim 10 M_{\odot}$. [48]. Изучены также газопылевые комплексы в туманности Ориона, W49, W51 и др. [49, 50]. В Орионе детально исследовано распределение как высокоскоростных, так и низкоскоростных компонент и построена кинематическая модель [50]. В туманности Ориона в 1979 г. произошла вспышка мощного мазерного H_2O -излучения. Плотность потока радиоизлучения достигала нескольких миллионов Ян, скорость излучающей области равнялась 8 км/с. Цикл РСДБ-измерений показал, что это мощное излучение генерируется цепочкой компактных областей, размеры которых не превышают 0,2 а.е., их яркостные температуры $T_{\text{я}} \geq 10^{17}$ К. Излучение имеет высокую степень поляризации, а плоскость поляризации меняется от компоненты к компоненте, но сохраняется для каждой из них. Высокая яркостная темпера-

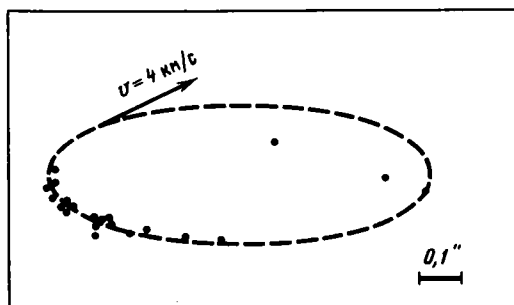


Рис. 2.12. Распределение мазерных источников в газопылевом комплексе W3 OH, соответствующее кольцевой либо дисковой структуре

тура компонент и степень линейной поляризации, характерное распределение компонент в пространстве предполагают, что наблюдаемое явление связано с излучением протопланетных колец, ориентированных в плоскости, параллельной лучу зрения [51]. Диаметр протопланетных колец ~ 20 а.е., скорость их вращения ~ 11 км/с, а масса протозвезды $\sim 2 M_{\odot}$.

2.4. Перспективы развития радиоинтерферометрии ; со сверхдлинными базами

Как ранее отмечалось, развитие РСДБ не ограничено масштабами Земли. Современные технические средства позволяют вывести на орбиту вокруг Земли один из элементов интерферометра и создать интерферометр Земля—Космос. Так, для исследований тонкой структуры источников мазерного H_2O -излучения разрабатывался проект интерферометра с 3-метровым космическим радиотелескопом [52]. Такой инструмент позволяет не только увеличить размеры базы — получить более высокое угловое разрешение, но, что более существенно, измерить практически все пространственные частоты изображения и, таким образом, получить точное распределение яркости объекта. Действительно, элемент интерферометра на орбите вокруг Земли образует базы переменной длины и ориентации с наземной радиоинтерференционной сетью. При этом синтезирование изображения происходит в сравнительно короткие сроки, что весьма существенно при измерениях вспышек квазаров и источников мазерного излучения.

Вывод космического радиотелескопа за пределы Земли позволяет достигнуть максимально возможных угловых разрешений, определяемых рассеянием на неоднородностях межзвездной и межпланетной среды и чувствительностью [44, 53]. На волнах метрового диапазона предельное угловое разрешение определяется рассеянием и достигается уже в земных условиях. На сантиметровых волнах ограничение связано с чувствительностью космического радиотелескопа [54]. При современных возможностях на волнах сантиметрового диапазона предельные длины баз могут достигать нескольких диаметров Земли. В будущем с ростом размеров космических антенн, снижением шумов приемной аппаратуры и расширением полосы регистрации сигналов длины баз будут увеличены.

Последние годы успешно проводятся работы по созданию интерферометра Земля—Космос. Полученные результаты весьма обнадеживают. Успешно проведены наблюдения на базе США—Канада с ретрансляцией сигналов через спутник. Таким образом, была показана возможность работы в режиме ретрансляции сигналов [55]. Следующим успешным шагом явился эксперимент по стабилизации частоты бортового стандарта наземным водородным эталоном [56]. И наконец, проведен первый эксперимент с геостационарным спутником — элементом космического радиотелескопа [56]. Сигналы квазара принимались на 5-метровой антенне спутника и ретранслировались на Землю. Одновременно этот же квазар наблюдался на 64-метровых радиотелескопах в Тидбинбилла (Австралия) и в Усуда (Япония). Сигналы регистрировались на системе МК-3 в полосе 16 МГц. Частота сигнала 2,3 МГц. Максимальная длина базы (проекция базы) достигала 17800 км. Получены коррелированные сигналы от многих квазаров.

У нас в стране, в ИКИ, успешно идут работы по созданию наземно-космического интерферометра — проект "Радиоастрон" [57, 58]. Успешно проведен эксперимент с целью отработки антенны космического радиотелескопа диаметром 10 м. Европейские страны разрабатывают аналогичный проект — КВАСАТ с диаметром космической антенны 16 м [59].

Продолжает развиваться и наземная техника РСДБ. Создается специальная антенная решетка из 10 антенн диаметром 25 м, распределенных на континентальной части США и островах Пуэрто-Рико и Гавайях. Она будет работать в диапазоне частот от 0,3 до 43 ГГц. Угловое разрешение системы будет достигать десятых долей миллисекунд дуги. Первые антенны в Сокорро и Китт-Пик вошли в строй. Инструменты оснащены специальной широкополосной системой регистрации сигналов. Эта решетка позволит начать систематические наблюдения по широкой программе, оперативно включаться в исследования вспышек квазаров и мазерных источников, проводить многолетние измерения тонкой структуры объектов, изучать их динамику. Дополнение этих наблюдений измерениями на крупных европейских радиотелескопах позволит определять размеры компактных компонент. Значительным продвижением вперед явилось бы строительство большой антенны на юге Индии. Этот инструмент позволил бы объединить все крупные антенны Восточного полушария в единую радиоинтерференционную сеть. Эта сеть позволила бы исследовать сверхтонкую структуру радиоисточников с предельным в условиях Земли угловым разрешением, расположенных как в южной, так и в северной полусфере, значительно расширила бы возможности измерений методом РСДБ. Создание новых систем РСДБ существенно расширяет возможности исследований в области астрометрии, геодинамики, навигационных измерений в дальнем космосе. С развитием техники РСДБ, повышением чувствительности радиотелескопов, освоением космоса станет возможным не только измерение тонкой структуры радиоисточников, но и определение расстояния до них [60].

РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТРЫ СО СВЕРХДЛИННЫМИ БАЗАМИ – НОВОЕ СРЕДСТВО РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ АСТРОМЕТРИИ, ГЕОДИНАМИКИ, СЛУЖБЫ ВРЕМЕНИ И КОСМИЧЕСКОЙ НАВИГАЦИИ

Развитие метода радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами для определения координат космических радиоисточников привело в 70-х годах к созданию в радиоастрономии и астрометрии нового направления – радиоастрометрии с широким кругом решаемых фундаментальных и прикладных задач (см., например, [1]). Причем для астрометрии, базирующейся до этого времени на позиционных оптических наблюдениях, это дало не только освоение нового участка спектра электромагнитного излучения космических объектов – радиочастотного и нового класса объектов – радиоисточников, но и новые методические приемы и соответственно независимые решения. Последнее чрезвычайно важно, когда речь идет об измерении величин на уровне 9-го знака по точности: в угловых измерениях до 10^{-9} рад, а в прикладных линейных измерениях глобальных масштабов до 10^{-9} радиуса Земли. Положительную роль здесь сыграл тот факт, что разработчиками радиоастрометрического направления оказались не астрометристы, а радиоастрономы, сумевшие по-новому подойти к решению проблем астрометрии и первыми увидеть исключительные возможности созданной ими новой техники радиоастрономических исследований – радиоинтерферометров со сверхдлинными базами (РСДБ).

Для решения задач астрометрии в радиодиапазоне оказалось весьма удачным сочетание свойств электромагнитного излучения космических радиоисточников и свойств земной атмосферы и космической среды, а также наличие сверхкомпактных космических радиоисточников с достаточной интенсивностью излучения. Благодаря радиопрозрачности космической среды и атмосферы Земли на частотах до 10^{10} Гц оказывается возможным наблюдать в радиодиапазоне объекты, удаленные на "край" Вселенной, практически вне зависимости от погодных условий, что обеспечивает существенное преимущество радиоастрометрии перед оптической – возможность проведения непрерывных измерений. При этом удаленность наблюдаемых космических объектов делает их идеальными реперами невращающейся фундаментальной системы координат – основы всех астрометрических исследований, а наличие среди них активных радиогалактик и квазаров с относительно большой мощностью излучения от компонент с малыми угловыми размерами делает возможным их наблюдения с помощью хотя и достаточно сложных, но вполне реализуемых РСДБ-средств.

Конечно, как и для других участков спектра электромагнитных волн, в радиочастотном диапазоне на точность измерений оказывают влияние неоднородности атмосферы Земли и космической среды. Причем в радиодиапазоне это влияние даже сильнее, чем в оптическом: здесь существенную роль играет так называемая влажная компонента атмосферы, связанная с наличием в ней водяного пара, а в длинноволновой части ее дополняют

еще ионизированная часть — ионосфера и межпланетная среда. Но, хотя действие ионосферы и межпланетной среды, обладающих частотно-дисперсионными характеристиками, и может быть прямо измерено путем приема на разнесенных частотах, а влияние "влажной" компоненты атмосферы определено по радиотеплолокационным измерениям яркостной температуры атмосферы в линии излучения водяного пара, даже без этих измерений влияние атмосферы Земли и космической среды приводит на волнах сантиметрового диапазона в эквивалентном рефракционном исчислении к ошибке менее $0,01''$ в абсолютных координатных РСДБ-измерениях и менее $0,001''$ в дифференциальных, если измерения проводить на базе 5–6 тыс. км, существенно превышающей масштабы указанных неоднородностей. Важно, что и для таких баз многие удаленные космические радиостанции остаются "точечными", т.е. излучение от них, принимаемое в разнесенных пунктах, остается взаимно-когерентным, что необходимо для получения соответствующего интерференционного отклика. Именно эти обстоятельства обеспечивают применимость РСДБ в решении радиоастрометрических задач и их приложений с точностями, более чем на порядок превышающими точность традиционных средств оптической астрометрии. Для оптических инструментов атмосфера накладывает фундаментальное ограничение по точности координатных измерений на уровне нескольких долей угловой секунды.

Как указывалось выше, интерференция возникает при когерентном наложении волновых полей, поэтому для получения интерференционного отклика при использовании РСДБ и с относительно широкополосными (для обеспечения необходимой чувствительности) системами независимого приема необходимо скомпенсировать взаимные временной и частотный сдвиги принимаемых в разнесенных пунктах сигналов от наблюдаемого космического радиостанции, вызываемые меняющимися во времени разностью расстояний от источника до пунктов приема интерферометра и их несинхронностью. Измеряя эти сдвиги, мы получаем информативную основу для решения астрометрических и смежных задач, и в этом качестве интерферометр можно рассматривать как совмещенный разностно-дальномерный и дифференциально-доплеровский инструмент. При этом для интерферометра с синхронными приемными системами определяемая разность дальности $\rho(t) = ct'(t)$ от наблюдаемого удаленного радиостанции до пунктов интерферометра, скорректированная на абберацию и эквивалентную рефракцию, является проекцией закрепленного ими вектора базы $\mathbf{b}$ на вектор положения этого источника $\mathbf{s}$:

$$\rho(t) = (\mathbf{bs})_t,$$

а частота интерференции определяет дифференциальный доплеровский сдвиг частоты принимаемых в разнесенных пунктах сигналов, вызванный вращением базы интерферометра (земной хорды) относительно наблюдаемого источника:

$$F'(t) = \frac{f_0}{c} ([\Omega \mathbf{b}]_t \mathbf{s}),$$

где Ω — мгновенный вектор вращения базы. Последующее определение параметров векторов $\mathbf{b}$, $\mathbf{s}$, Ω и составляет предмет радиоастрометрии в це-

лях установления небесной и земной систем координат и их взаимной связи, геодинамических, геодезических и других приложений. При этом номинальная (без учета геометрических факторов) разрешающая способность радиоинтерферометра по измерениям задержки τ' составляет в угловой мере $\sigma\theta = \sigma\tau'/b$ и в линейной мере $\sigma L = c\sigma\tau'$, в частности при $\sigma\tau' = 10^{-10}$ с на базе в 6 тыс. км получаем $\sigma\theta = 10^{-3}$ угл.с и $\sigma L = 3$ см.

В радиоинтерферометрах, реализуемых с использованием систем независимого приема, измеряемая в процессе совместной обработки записанных сигналов величина их взаимного запаздывания включает, кроме геометрической части $\tau'(t)$, добавку $\Delta\tau(t)$ из-за несинхронности шкал времени $\Delta\tau_{\text{ш}}(t)$ в пунктах приема, электрической несимметрии приемных трактов $\Delta\tau_{\text{пр}}(t)$ и разности электрических толщин атмосферы над пунктами приема $\Delta\tau_{\text{атм}}(t)$:

$$\pi(t) = \tau'(t) + \Delta\tau_{\text{ш}}(t) + \Delta\tau_{\text{пр}}(t) + \Delta\tau_{\text{атм}}(t),$$

а частота интерференции определяется не только вращением базы, но и скоростью расхождения шкал времени на момент измерений

$$F(t) = F'(t) + f_0 \frac{d(\Delta\tau(t))}{dt}.$$

Следует заметить, что в координатных измерениях с применением сфазированных интерферометров с длинами баз $b < 10^6 \lambda$ определение длины базы интерферометра, синхронизация (фазирование) его пунктов и задание всемирного времени (параметров вращения Земли) к задачам метрологического обеспечения этих измерений проводились независимыми методами с применением средств соответствующих служб. Однако на сверхдлинных базах ($b \geq 10^6 \lambda$) точности средств геодезии и служб единого и всемирного времени оказываются недостаточными для обеспечения применения известных методов координатных измерений.

Первые исследования возможностей применения метода РСДБ для измерения геодезических базисов, синхронизации шкал времени и измерения скорости вращения Земли были проведены в НИРФИ В.С. Троицким [2] и В.А. Алексеевым [3]. В НИРФИ была выполнена также первая в СССР работа по прикладному использованию метода РСДБ для определения рассинхронизации стандартов частоты—времени, разнесенных более чем на тысячи километров, по результатам интерферометрии космических лазеров, излучающих в линии водяного пара на длине волны 1,35 см [4]. Аналогичные работы проводились затем в ИКИ и ГАИШ [5–7].

В начале 70-х годов в ИРЭ АН СССР и НИРФИ были независимо получены самосогласованные решения задачи совместного определения параметров базы, синхронизации шкал времени интерферометра и угловых координат космических радиоисточников. Суть метода состояла в формировании такого числа независимых результатов измерений задержек $\tau_j(t_i)$ и частот интерференции $F_j(t_i)$ по наблюдениям группы из J источников в различные моменты времени t_i (на различных часовых углах), которое обеспечивало бы определение параметров функций $\tau_j(t)$ и $F_j(t)$. Это достигается при наблюдении трех источников ($J = 3$), одного из них минимум на 5-часовых углах, двух других — на 3-часовых, если считать вращение Земли равномерным ($\Omega = \text{const}$), а текущая рассинхронизация шкал

времени представляется линейной функцией $\Delta\tau_{\text{ш}}(t) = \Delta\tau_0 + kt$. Недостатком этого "абсолютного" метода является зависимость получаемого решения от принятой модели вращения Земли и особенно модели расхождения шкал времени, даже если их описывать многопараметрическими функциями.

В 1974–1975 гг. в НИРФИ был предложен и разработан метод решения комплексной задачи установления небесной системы координат и определения в ней параметров базы интерферометра и соответственно параметров вращения Земли на основе дифференциальных радиоинтерферометрических измерений на сверхдлинных базах путем наблюдения в близкие моменты времени двух космических радиоисточников и определения дифференциальных величин

$$\Delta\tau_{0j}(t) = \tau_0(t) - \tau_j(t), \quad F_{0j}(t) = F_0(t) - F_j(t).$$

Таким образом, получается "чистая" астрометрическая информация, и, хотя получаемое решение на основе наблюдений группы из пяти радиоисточников внутри околосуточного интервала времени остается зависимым от принятой модели вращения Земли, сама эта модель определяется на основе дифференциальных наблюдений пары радиоисточников независимо от решения собственно астрометрической (координатной) задачи [8, 9].

Метод дифференциальных измерений для решения астрометрических задач был развит сотрудниками Ленинградского филиала САО АН СССР (ЛФСАО) А.Ф. Дравских, Г.А. Красинским и А.М. Финкельштейном, показавшими возможность геометрического измерения дуг между космическими радиоисточниками, если одновременно наблюдать девять источников четырёхэлементным интерферометром или ту же группу двухэлементным интерферометром в три разнесенных момента времени [10]. Формально этот метод дает строгое решение, не требующее привлечения каких-либо геофизических и геодинамических теорий или представлений о ходе часов в пунктах интерферометра, однако вследствие большого ранга и порядка формируемой системы уравнений и ее плохой геометрической обусловленности из-за необходимости наблюдений большой группы источников этот метод дает большую флуктуационную погрешность. В последующем группой ЛФСАО был выполнен большой объем теоретических исследований в области радиоастрометрии с применением РСДБ, составивший содержание монографии [11]. Отдельные теоретические исследования в области радиоастрометрии велись также сотрудниками ИТА АН СССР (И.Д. Жонголович и др.) [12].

В техническом плане радиоинтерферометрический комплекс со сверхдлинными базами для решения астрометрических задач и их приложений должен иметь возможно более широкую полосу частот Δf приема для получения высокой точности измерения задержки ($\sigma\tau \sim 1/\Delta f$) и обеспечивать сохранение когерентности принимаемых сигналов на длительном интервале времени для получения высокой чувствительности и высокой точности определения частоты интерференции ($\sigma F \sim 1/T_{\text{кор}}$); кроме того, он должен быть обеспечен метрологическими средствами для точного измерения инструментальных параметров. Такой комплекс был создан в НИРФИ в начале 80-х годов на основе крупнейших антенн СССР в Евпатории, Усурийске и Медвежьих озерах, образовавших интерферометр

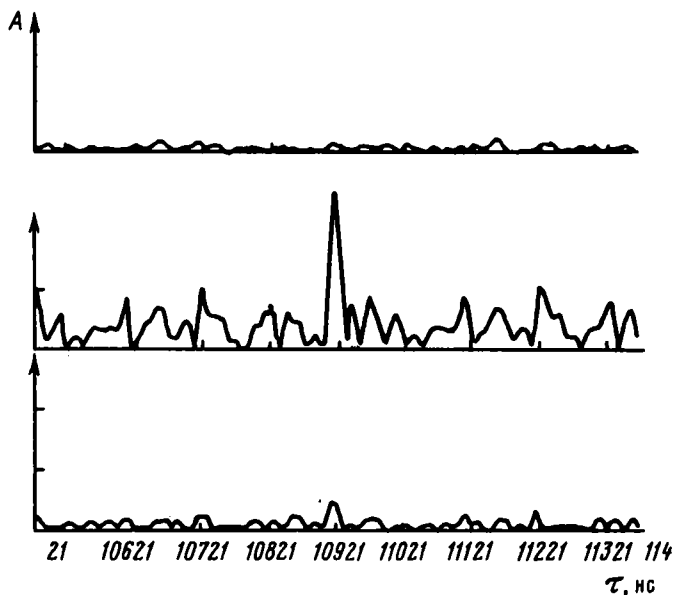


Рис. 3.1. Синтез интерференционного отклика по восьмичастотным каналам в полосе 46 МГц от квазара 3С 273 (A — амплитуда интерференционного отклика для различных частот интерференции)

с базами 1200 км в меридиональном и 7000 км в экваториальном направлениях. Основными разработчиками соответствующего аппаратного комплекса явились Э.Д. Гатэлюк, Б.Н. Липатов, А.Е. Крюков, А.С. Сизов, Н.А. Князев, А.Ф. Дементьев, А.А. Антипенко [13]. Наличие в составе указанного комплекса систем автономного контроля его параметров позволило проводить эксперименты с полной уверенностью в работоспособности комплекса, в том числе в режиме синтеза широкой полосы частот принимаемых сигналов, когда она много больше полосы частот регистрируемых сигналов. На рис. 3.1 приведен результат синтеза отклика радиоинтерферометра при наблюдении квазара 3С 273; прием проводился по восьми частотным каналам в общей полосе 46 МГц при полосе регистрации 1 МГц, реализованное разрешение по τ составило $0,7 \cdot 10^{-9}$ с, что на базе 1200 км составило номинальное угловое разрешение в координатных измерениях $0,03''$ [14].

Высокоточные радиоинтерферометрические измерения координат естественных и искусственных космических радиоисточников открывают интересные перспективы исследования космического пространства. В 1984 г. сотрудниками НИРФИ и ИКИ был проведен эксперимент по исследованию околосолнечной плазмы методом радиоинтерферометрии сигналов автоматической межпланетной станции (АМС) "Венера-15", когда она находилась за Солнцем на близком от него угловом расстоянии [15]. Существенное расширение спектра частот интерференционного отклика от сигналов передатчика АМС, прошедших через околосолнечную плазму, по сравнению со спектром интерференции сигналов от квазара 3С 454.3,

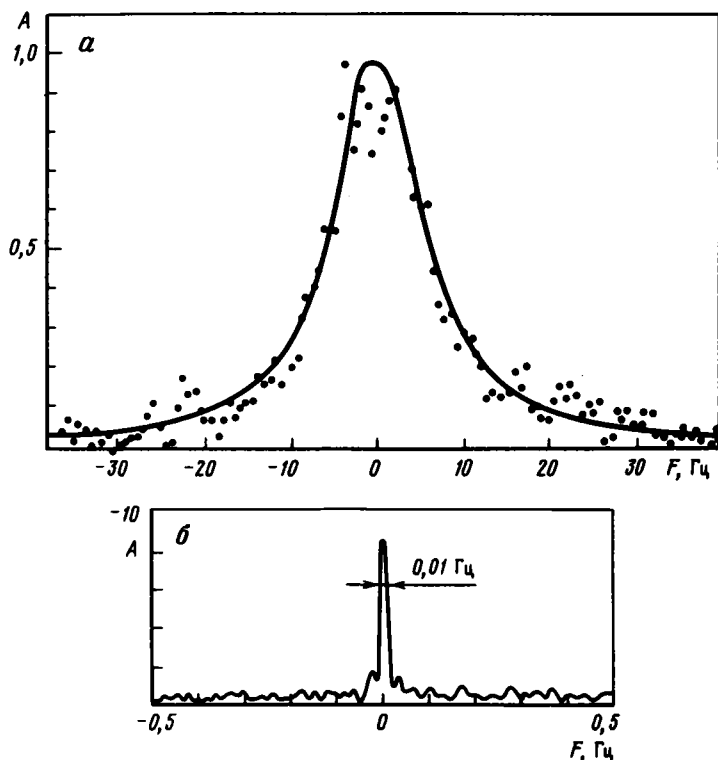


Рис. 3.2. Спектры интерференционных откликов от АМС "Венера-15" (а) и квазара 3С 454.3 (б)

находящегося на большом угловом расстоянии от Солнца (рис. 3.2), связано с влиянием неоднородностей околосолнечной плазмы, и это дает новый метод ее исследований. В 1986 г. этой группой при содействии сотрудников ИРЭ АН СССР был проведен интерферометрический эксперимент по исследованию радиофизических характеристик комы кометы Галлея в дециметровом диапазоне при пролете АМС "Вега-1" и "Вега-2"; измерялись отклонения частоты интерференции из-за рефракционного смещения в коме "видимых" в дециметровом диапазоне положений космических аппаратов (КА). Из представленных на рис. 3.3 результатов даже без детального анализа видны моменты входов КА в кому и выходов из нее; интервал пребывания КА в коме 3 ч, что соответствует ее радиоразмеру 1 млн км; внутри 200-секундного интервала частота интерференции изменялась на 0,005–0,01 Гц, что связано с наличием в коме неоднородностей с характерным размером 1000 км вдоль траектории полета КА. Реализованное динамическое угловое разрешение составило 10^{-3} угл.с/с [16].

Радиоинтерферометрический метод с радиопросвечиванием отличается от классического доплеровского независимостью получаемых результатов от стабильности частоты бортового передатчика, а от дисперсионного интерферометрического с приемом сигналов когерентных частот — определение

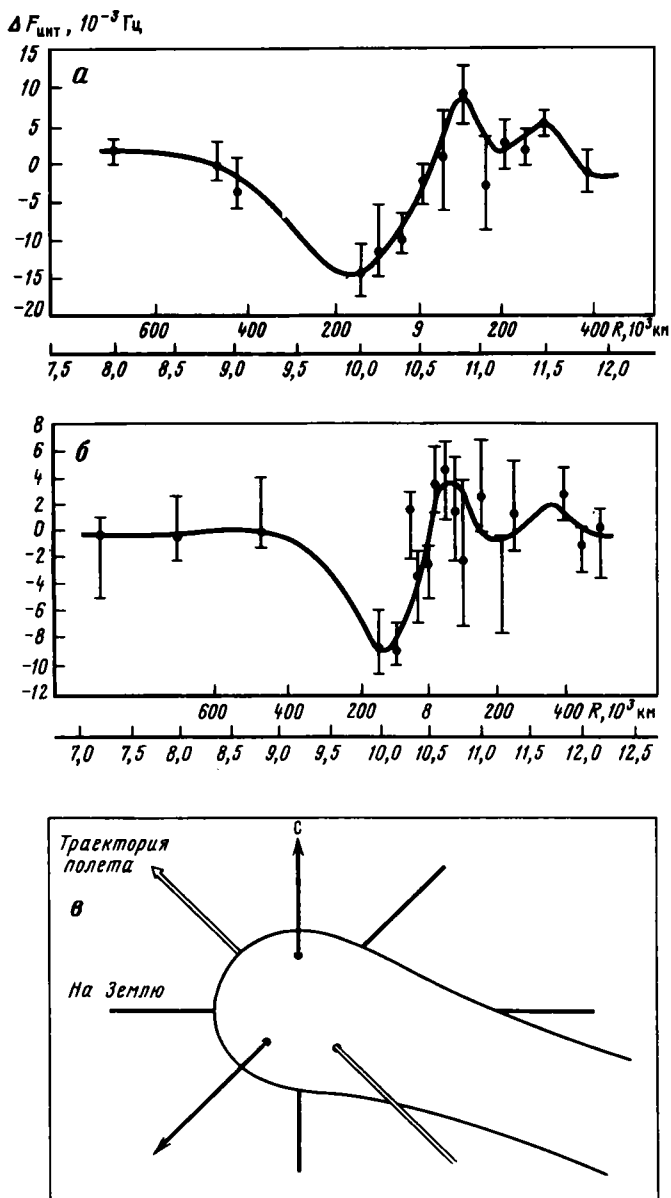


Рис. 3.3. Рефракционные смещения частоты интерференции сигналов от АМС "Вега-1" (а) 6.03.86 г. и "Вега-2" (б) 9.03.86 г. при их прохождении через кому кометы Галлея (в)

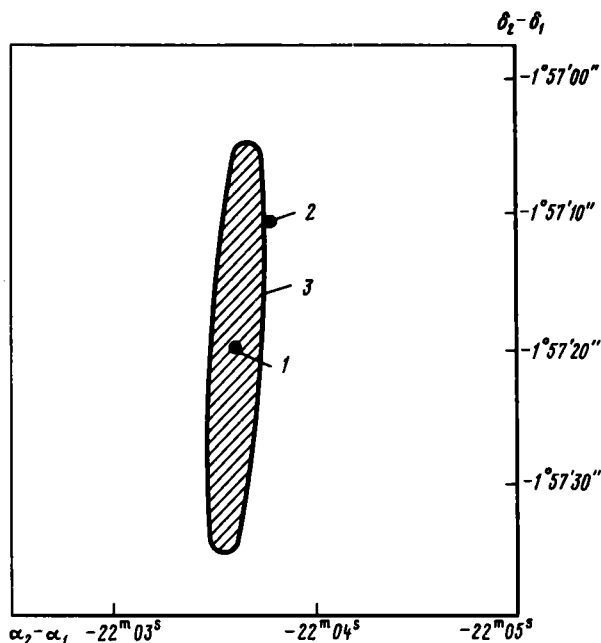


Рис. 3.4. Геоцентрическое угловое расстояние между АМС "Вега-2" и "Вега-1" 7.03.88 г. в 4 ч 20 мин по измерениям НИРФИ–ИКИ (1), по данным обработки траекторных измерений по программе "Лощман" (2) (3 – эллипсоид ошибок измерений)

не только ионизированной компоненты среды распространения сигналов, но и ее нейтральной составляющей. Более того, для интерферометрических исследований зондирующий сигнал может быть и широкополосным, в том числе естественного происхождения от астрофизического объекта, при этом измерения задержки в дополнение к измерениям частоты интерференции дают информацию, не получаемую другими методами.

Первый этап эксперимента "Вега" включал исследования динамики атмосферы Венеры путем высокоточных измерений движений азростатного зонда относительно орбитального аппарата методом РСДБ. Различные варианты таких измерений были представлены ИКИ и НИРФИ еще в 1974 г. на советско-французском симпозиуме по проекту "ЭОС–Венера" [17]. Для проведения эксперимента "Вега" была организована международная РСДБ-сеть, включающая 20 крупнейших радиотелескопов и позволяющая синтезировать глобальный инструмент с размером апертуры порядка диаметра земного шара. Советская часть сети включала антенны диаметром 70 м в Евпатории и Уссурийске, 22 м в Симеизе и Пушино, 24 м в Улан-Удэ и 64 м в Медвежьих озерах [18]. Измерения проводились по фазоманипулированным сигналам бортовых передатчиков на волне 18 см, имеющим 3-частотный линейчатый спектр в полосе 65 МГц, что позволяет разрешить фазовую неоднородность в дифференциальных интерферометрических измерениях близких объектов. Комплекс РСДБ, приемообразующие системы которого адаптированы для регистрации сигналов, излу-

чаемых с борта КА и от астрофизических объектов, может быть применен для определения положения этого КА в небесной системе координат, закрепленной квазарами, для навигационного обеспечения его полета или для метрологического обеспечения сложных космических или наземно-космических комплексов, как, например, в проекте наземно-космического радиоинтерферометра "Радиоастрон". Существенно, что на сверхдлинных базах интерферометрия даже весьма узкополосных телеметрических сигналов дает угломерную точность выше достигаемой другими методами этих измерений в оперативном режиме; если же с борта КА излучается специальный широкополосный сигнал со сплошным или линейчатым спектром, то погрешность измерений угловых координат КА может составить 10^{-2} угл.с. в абсолютных и 10^{-3} угл.с. в дифференциальных измерениях относительно близких квазаров.

На рис. 3.4 представлен результат измерения взаимного углового положения АМС "Вега-1" и "Вега-2" 7.03.86 г. путем интерферометрии телеметрических сигналов этих аппаратов с помощью РСДБ-комплекса НИРФИ, организованного на базе Крым—Подмосковье длиной 1200 км в дециметровом диапазоне волн. На этом же рисунке приведены данные измерений с помощью РСДБ-комплекса США (DSN), который принимал специальный трехчастотный сигнал в полосе 6,5 МГц в рамках программы "Ложман". Широкополосные измерения планировалось проводить при осуществлении проекта "Фобос"; реализация здесь высокой точности в определении координат долговременной астрофизической станции и орбитального аппарата позволяла решать одну из новых задач астрометрии — установление связи оптической и радиосистем фундаментальных небесных координат.

В заключение стоит, наверное, заметить, что до 70-х годов астрометрия в целом относилась к числу сугубо прикладных наук. Метод РСДБ в этой области исследований не менее прогрессивен, чем в астрофизике, и если принять существующее разделение задач астрофизики (исследования энергетических характеристик) и астрометрии (исследования геометрических характеристик) космических объектов, то понятно, что этот метод, существенно расширив масштабы и точность исследований в обеих отраслях, дает путь к комплексному рассмотрению вопросов создания и развития Вселенной.

II. РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СОЛНЦА И МЕЖПЛАНЕТНОЙ ПЛАЗМЫ

Глава 4

РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СОЛНЦА В СССР

Историю развития радиоастрономических исследований Солнца в нашей стране можно условно разделить на три этапа. В период до появления крупных радиотелескопов (1947–1958 гг.) ученым приходилось тратить очень много сил и времени не столько на сами наблюдения, сколько на подготовку аппаратуры, и лишь настойчивость и изобретательность привели к тому, что некоторые важные особенности радиоизлучения Солнца были замечены уже тогда. В этот период был накоплен опыт сооружения радиотелескопов, поляриметров, интерферометров, проведения относительных и абсолютных измерений. Важными достижениями этого периода являются: экспериментальное доказательство того, что метровое излучение возникает в солнечной короне; обнаружение свехкороны Солнца по покрытиям Крабовидной туманности; формирование основ теории радиоизлучения Солнца.

В указанный период почти отсутствовала связь радиоастрономических наблюдений с общей физикой Солнца и оптическими исследованиями, которые имели к этому времени трехсотлетнюю историю. Практически не было также длительных однородных рядов регулярных наблюдений, которые, как показывает опыт, являются одной из основ правильного понимания самой природы солнечной активности. Отсутствие достаточно крупных антенн в этот период не позволяло также вести наблюдения с детализацией отдельных локальных источников радиоизлучения Солнца.

Преодоление этих ограничений явилось наиболее важным моментом второго периода, длившегося около 20 лет, который весьма условно можно ограничить интервалом с 1958 по 1974 г. В этот период происходят важные сдвиги в разработке теории радиоизлучения Солнца: от гипотез об основных механизмах генерации радиоизлучения в солнечной атмосфере происходит переход к теории этих механизмов — исследуется эффект генерации поперечных электромагнитных волн из продольных плазменных колебаний, вводится тепловой магнитотормозной механизм радиоизлучения, начинают широко использоваться достижения физики плазмы. Разрешающая способность в регулярных наблюдениях Солнца достигает величины порядка одной угловой минуты (наблюдения на радиотелескопах БПР и РТ-22). Выясняются многие спектральные особенности солнечного радиоизлучения, устанавливаются статистически достоверные связи явлений на Солнце в оптическом и радиодиапазонах. В затменных наблюдениях исследуются тонкие детали распределения яркости по локальным источникам и на лимбе спокойного Солнца.

Во второй половине 70-х годов наступает, по-видимому, качественно новый период солнечной радиоастрономии: появляются инструменты, разрешающая способность которых измеряется секундами или десятками секунд дуги (в СССР — это радиотелескопы РАТАН-600, ССРТ), проявляется интерес к тонким деталям спектра и очень быстрым временным изменениям (10^{-3} –1 с). В теории плазменных процессов удается получить количественные результаты и объяснить тонкие детали динамических спектров, такие как, например, "зебра"-структура всплесков, частотное расщепление и др. Разрабатываются методы прогноза и диагностики источников солнечной активности, устанавливается связь физических параметров для конкретных событий, определяемых по радио, оптическим, рентгеновским и другим внеатмосферным наблюдениям Солнца. Этот этап еще не завершен, и можно думать, что именно на этой стадии солнечная радиоастрономия объединится с другими разделами физики Солнца. Это существенно повысит эффективность исследований Солнца.

Предложенное исследование на периоды, конечно, довольно условно — разные разделы радиофизики Солнца имеют разные временные веи и не всегда они четко прослеживаются. Но оно, по нашему мнению, помогает понять суть происходящего. Аналогичные процессы в развитии солнечной физики имели место, естественно, и за рубежом с более или менее теми же этапами.

В соответствии со сказанным выше дальнейшее изложение развития событий первого этапа радиоастрономических исследований Солнца в СССР целесообразно провести раздельно по методам наблюдений, а последующих этапов — по результатам анализа отдельных компонент солнечного радиоизлучения.

4.1. Методы солнечной радиоастрономии

Наблюдения во время солнечных затмений. Наблюдения во время солнечных затмений упоминаются в первую очередь в силу того, что в нашей стране это были вообще первые наблюдения радиоизлучения Солнца. Организованные академиком Н.Д. Папалекси и выполненные С.Э. Хайкиным и Б.М. Чихачевым во время советской экспедиции в Бразилию, они проводились при покрытии 20.05. 47 г. Солнца Луной, имевшей угловой диаметр на 3,8% больше, чем у Солнца. При максимальной фазе затмения поток радиоизлучения, приходивший к наблюдателю, уменьшился не на 100%, а всего на 60% [1]. Полученный результат экспериментально устанавливал факт существования радиоизлучения солнечной короны¹, и его авторы (включая Н.Д. Папалекси) впоследствии были удостоены соответствующего диплома об открытии.

¹ Наблюдения солнечных затмений, выполнявшиеся за рубежом до 1947 г., проводились только в сантиметровом диапазоне волн, где подобный эффект выражен значительно слабее и не был интерпретирован соответствующим образом, хотя, например, при наблюдениях А. Ковингтона в 1946 г. ($\lambda = 10,6$ см) было зафиксировано "опережение" первым "радиоконтактом" оптического на 3 мин. Такая задержка была объяснена наличием протуберанца на краю солнечного диска. Одновременные наблюдения Дж. Хагеном затмения в 1947 г. дали остаток излучения около 3–4%.

К тому времени стали известны результаты первых теоретических исследований особенностей радиоизлучения солнечной атмосферы, выполненных в нашей стране [2, 3]. Проведенные расчеты позволили оценить уровень возникновения радиоизлучения в солнечной атмосфере, оказавшийся тем выше, чем больше длина волны, на которой ведутся измерения. Другими словами, "радиодиаметр" Солнца должен быть заметно больше "оптического", что и было подтверждено упомянутым наблюдением, проводившимся на длине волны 1,5 м.

Наблюдения солнечных затмений в нашей стране продолжались в последующие годы многими исследователями. При этом традиционно измерялись: размеры активных областей в радиодиапазоне, потоки их излучения, "остаточные" потоки при максимальной фазе затмения и размеры солнечного диска. Перечисленные результаты получались из анализа отклонений записи изменений потока радиоизлучения Солнца от плавной кривой "геометрического" затмения. Незначительность дифракционных явлений на краю лунного диска позволяла (если устранить ошибки другого происхождения) переходить от разностей между моментами времени, соответствующими изменениям кривой на записи, к угловым размерам с погрешностью не более нескольких угловых секунд.

Последующие наблюдения (1952 и 1954 гг.) проводились на длинах волн 3,2 и 10 см (ГИФТИ, руковод. В.С. Троицкий [4]); 3,2 см (ЛГУ, руковод. А.П. Молчанов [5]); 1, 1,5, 2 и 2,6 м (ФИАН, руковод. В.В. Виткевич [6]); 1,5 м (КраО АН СССР, руковод. И.Г. Моисеев [7]); 0,5, 1,5 и 4,2 м (БАО АН АрмССР, руковод. В.А. Санамян [8]) и в миллиметровом диапазоне волн, на длине волны 0,8 см (ФИАН, руковод. А.Е. Саломонович [9]).

В дальнейшем при наблюдениях стало возможным использовать разработанную в ГАО АН СССР [10] аппаратуру для измерения круговой поляризации, значительно более чувствительную, чем применявшаяся за рубежом. Наблюдения поляризации успешно выполнялись в 1956 г. во время затмения, наблюдавшегося в ФИАНе и ГАО АН СССР на длинах волн 0,8 и 3,2 см соответственно. Следует отметить, что, по-видимому, впервые при наблюдении составляющей радиоизлучения, поляризованной по кругу, в 1956 г. ($\lambda = 3,2$ см) удалось надежно разделить активную область на отдельные части — определить для нее "тонкую структуру"². Было установлено существование более "яркой" детали размером 0,5' и менее "яркой" большего размера [11].

Большого успеха добились совместные экспедиции советских и китайских ученых, наблюдавшие солнечное затмение 19.04.58 г. От Советского Союза в наблюдениях приняли участие две группы: из Академии наук, организованная по инициативе С.Э. Хайкина, и из Министерства высшего образования, организованная В.С. Троицким. Первая группа проводила совместные наблюдения с китайскими учеными под руководством А.П. Молчанова (СССР) и Чен фан Юня (КНР) на длинах волн 0,8; 2; 3,3; 4,5; 5,1 см в г. Санья на о-ве Хайнань [12, 13]. Вторая группа, руково-

² "Тонкая структура" активной области ранее была обнаружена только для неполяризованного излучения во время наблюдения частного затмения 20.06.55 г. японскими учеными (Т. Хатанака и др.).

димая В.С. Троицким (СССР), наблюдала на длинах волн 1,6; 3,2 и 10 см в селении Лин Шуй на том же острове [14].

Из большого числа результатов, полученных при наблюдении этого затмения, следует выделить два: исследование тонкой поляризационной структуры локального источника, связанной с большой биполярной группой пятен [15], и анализ спектра интенсивностей того же локального источника [16].

Запись поляризации, полученная на длине волны 3,3 см [15], показала, что не только каждое пятно группы имеет свой поляризованный источник с соответствующим знаком поляризации, но даже два ядра пятна, окруженные общей полутенью, имеют отдельные области генерации поляризованного излучения.

Интересным результатом наблюдения затмения в 1958 г. явилось также вычисление магнитного поля по результатам измерений круговой поляризации радиоизлучения активной области [16]. Метод вычисления, предложенный для тормозного механизма, дал значение магнитного поля в наблюдавшейся активной области значительно большее, чем ожидалось. Использование этого метода и методов, предложенных позднее (см. ниже), трудно переоценить, так как удастся определять магнитное поле на таких высотах в солнечной атмосфере, которые недоступны для оптических измерений.

Другой результат состоял в том, что эти измерения дали возможность впервые построить спектр радиоизлучения отдельной активной области в сантиметровом диапазоне волн³ [17]. Особенностью найденного спектра было наличие сильно выраженного максимума потока радиоизлучения на длине волны около 5 см.

Сам факт существования максимума и его величину не удавалось объяснить, оставаясь в рамках представлений о тормозном излучении, поэтому появилась необходимость учета магнитотормозного механизма. Теоретические исследования В.В. Железнякова [18] показали, что совместный учет тормозного и магнитотормозного механизмов хорошо объясняет полученный спектр. При этом для волн короче 4 см более существенным является влияние первого, а для более длинных — влияние второго из перечисленных механизмов.

Кроме отмеченных выше результатов, имеющих неоспоримый приоритет, "традиционные" измерения имели не менее важное значение, так как компенсировали в какой-то степени недостаток наблюдений во время затмений — их эпизодичность. В частности, записи, полученные на длинах волн 3,2; 3,3; 4,5; 5,1 см, позволили установить наличие "тонкой структуры" источника и в неполяризованном излучении.

Наблюдения во время затмений Солнца продолжались и в последующие годы. К 1964 г. число публикаций о полученных результатах достигло примерно 100, из которых около 40 принадлежит советским авторам.

Полученная информация являлась весьма ценной, так как позволяла установить ряд факторов, которые можно было использовать для проверки (или для построения) теоретических описаний явлений в солнечной атмосфере.

³ Ранее были известны спектры, полученные из результатов наблюдений, выполненных в разное время, что снижало их достоверность и не позволяло отнести их к определенному типу области.

Наблюдения на малых радиотелескопах. Наблюдения на небольших радиотелескопах вне затмений позволяют измерять суммарный поток радиоизлучения всего Солнца, а при некотором усложнении аппаратуры — его поляризацию, положение эффективного центра радиоизлучения Солнца, спектральные характеристики. Выделение излучения активных областей возможно только в отдельных случаях, когда имеется уверенность, что на Солнце в момент наблюдения имеется только одна область, поток излучений которой настолько велик, что после вычитания доли излучения "невозмущенного" Солнца остается величина, доступная для обработки. Однако наблюдение на небольших радиотелескопах сравнительно легко вести непрерывно, обеспечивая необходимый материал для статистических исследований и изучения всплесков радиоизлучения Солнца.

В нашей стране подготовка аппаратуры для подробных наблюдений, по-видимому, началась в различных учреждениях примерно в одно и то же время — в 1945—1946 гг. Первые наблюдения Солнца относятся к 1949 г. Они выполнялись на длинах волн 1,5 и 4 м в ГИФТИ [19], 3,2 см в ЛГУ [20], 3,2, 10, 23, 50 см и 1,5, 2, 4 м в ФИАНе [21].

Группой сотрудников ГИФТИ на базе упомянутых установок были успешно решены вопросы абсолютной калибровки радиотелескопов в сантиметровом диапазоне волн [22]. Эти работы, являющиеся чрезвычайно важными для использования результатов наблюдений, были продолжены и привели к оригинальному методу абсолютных измерений, использующему "искусственную Луну" с учетом дифракционных явлений на ее краях и являющемуся до сих пор наиболее совершенным [23, 24].

При реализации модуляционного метода регистрации было предложено сканировать диаграмму направленности по конусу, на образующей которого находилось Солнце [19]. Отсутствие хороших модуляторов в то время делало такой способ также весьма практичным.

В ЛГУ первые наблюдения служили для определения эффективной температуры суммарного радиоизлучения Солнца и оценки возможности использования радиоизлучения Солнца в навигационных приборах, а также для определения диаграмм направленности антенных систем. В дальнейшем эти наблюдения, продолженные в ГАО АН СССР, позволили предложить метод абсолютных измерений потока радиоизлучения Солнца по "искусственным Солнцу и Луне", использующий смену калибровочных сигналов с помощью плоского зеркала [25], а также были использованы для решения ряда задач солнечно-земной физики.

В ФИАНе в то же время были разработаны методы калибровки малых радиотелескопов в метровом диапазоне волн [26].

После первых наблюдений, выполненных в 1949 г., диапазоны волн, на которых велись измерения, и число организаций, ведущих такие наблюдения, стали быстро расширяться. Об этом подробно сказано в сборнике [27]. Начиная с 1959 г. в связи с появлением больших радиотелескопов использование малых радиотелескопов ограничивается, как правило, рамками "службы", наблюдениями солнечных затмений и измерениями, необходимыми для решения отдельных специальных задач.

Особенно ценны непрерывные наблюдения радиоизлучения Солнца для исследования солнечно-земных связей. Всплески радиоизлучения, возникающие при солнечных вспышках, коррелируют с разнообразными явлениями

ями в околоземном космическом пространстве и несут важную дополнительную информацию о солнечной активности. Интерес к такому аспекту исследований радиоизлучения Солнца возник в нашей стране вместе с началом наблюдений. Начиная с 1955 г. в ГИФТИ на станции Зименки проводились регулярные наблюдения по программе "Службы Солнца" на длинах волн 1,6 и 3,2 см, дополненные в 1957 г. измерениями по программе МГГ на длинах волн 1,5 см, 3 и 10 м.

Из нетривиальных наблюдений на малых антеннах следует отметить определение положения эффективного центра радиоизлучения Солнца на длине волны $\lambda = 10$ см, проводившееся В.В. Виткевичем [28] в 1953 г. Такие наблюдения представляли также и методический интерес, так как позволяли получать информацию о радиоизлучении активных областей на Солнце без проведения абсолютных калибровок радиотелескопа. В цикле выполненных наблюдений, в частности, было зарегистрировано появление локальных источников на восточном краю солнечного диска до появления соответствующих им групп пятен и более позднее, чем заход этих групп, исчезновение источников на западном краю.

Интересный способ спектральных наблюдений на малых антеннах был разработан и использован А.Ф. Дравских [29], начавшим в декабре 1958 г. серию наблюдений "наклона спектра" всплесков радиоизлучения Солнца в области $\lambda = 3$ см. Он проводил регистрацию суммы и разности сигналов на двух близких волнах с помощью одного приемного устройства, что делало результат независимым от изменений характеристик аппаратуры и избавляло от необходимости выполнения абсолютных калибровок. Полученные результаты свидетельствовали о сильных изменениях спектра во время всплеска, что дало интересный материал для теоретического анализа и, в частности, ставило под сомнение результаты наблюдений зарубежных радиоастрономов, располагавших менее совершенной аппаратурой⁴.

Наблюдения на интерферометрах. Стремление получить информацию о радиоизлучении отдельных активных областей на Солнце (а в то время требовалось доказать кажущуюся теперь очевидной связь повышенного радиоизлучения с активными образованиями, наблюдаемыми на Солнце в оптическом диапазоне) привело к необходимости использования для наблюдений интерферометров. Интерферометры, имеющие антенны, разнесенные в одном направлении, давали возможность получать высокое угловое разрешение, правда, лишь в одном направлении. Все же существенным достоинством интерференционных методов в отличие от измерений во время затмений Солнца являлась возможность регулярных наблюдений, непрерывных в течение значительных промежутков времени.

Первые интерферометрические измерения в СССР были выполнены в 1949 г. в ФИАНе В.В. Виткевичем [21] на длине волны 50 см в целях изучения формы солнечной короны и Б.М. Чихачевым [30] на длинах волн 1,5 и 2 м для исследования радиоизлучения активных областей на Солнце. В обоих случаях применялся так называемый "морской" интерфе-

⁴ Имеются в виду наблюдения Ковингтона на длинах волн 10,7 и 10,2 см в 1956–1957 гг., при которых он не зафиксировал существенных изменений спектра всплесков.

рометр, использовавший в качестве второго зеркала поверхность моря. Цикл наблюдений Виткевича показал, что асимметрия формы короны в 1951–1954 гг. доходила до 25–30%, а наблюдения Чихачева позволили установить соответствие положений радиоисточников и групп пятен. Более точно были определены размеры радиоисточников, оказавшихся равными около $6-7'$. С 1952 г. в ФИАНе, кроме "морских", стали использовать интерферометры с двумя антеннами на длине волны 50 см с базой 36 см.

В 1951 г. были начаты наблюдения на интерферометре в БАО АН АрмССР на длинах волн 50 см, 1,5 и 4,2 м. Для наблюдения Солнца он затем использовался во время затмения в 1954 г. [31].

Исследованиям солнечной короны методом ее "просвечивания" радиоизлучением Крабовидной туманности, предложенным Виткевичем [32], и развитию этих работ посвящена следующая глава этой книги.

Так как для просвечивания солнечной короны источник излучения должен быть на небольшом угловом расстоянии от Солнца, то исключение излучения самого Солнца проводилось выбором базы интерферометра таким образом, чтобы интерференционная картина от Солнца отсутствовала, а от малых источников сохранялась.

В дальнейшем предложенный Виткевичем способ уменьшения влияния излучения солнечного диска (невозмущенная часть) на регистрацию излучения источников с малыми угловыми размерами использовался многими наблюдателями для измерений излучения активных областей на Солнце.

Следует также отметить, что Виткевичем в этот период времени были очень подробно исследованы особенности наблюдений с помощью радиоинтерферометров и сделаны оригинальные предложения по их усовершенствованию.

Появление больших радиотелескопов. Недостатком больших интерферометров, составленных из двух антенн, является их "веерная" диаграмма, состоящая из узких лепестков, ширина которых определяется базой — расстоянием между антеннами. При наличии на Солнце нескольких активных областей их разделение на таком интерферометре оказывается практически невозможным. Подавить один или несколько промежуточных лепестков можно либо добавлением новых антенн, либо перемещением одной из двух антенн с последующим сравнением полученных записей. Последний вариант приводит к результату, усредненному за все время перестановок антенн, и для изменчивого радиоизлучения Солнца мало подходит. Наиболее радикальным способом является заполнение всей базы интерферометра антеннами и образование сплошной отражающей поверхности. Однако при этом возникают трудности обеспечения формы поверхности с требуемой точностью. Выход был найден С.Э. Хайкиным и Н.Л. Кайдановским [33], предложившими оригинальную антенну типа БПР с "переменным профилем". (Об этой и других антеннах рассказывается в гл. 1.)

В отличие от двухантенного интерферометра, начавшего работать в том же году во Франции на длине волны 3,2 см, к тому же с меньшей угловой разрешающей способностью ($\sim 3'$), важным достоинством БПР является возможность выполнения наблюдения одновременно в широком диапазоне длин волн: $0,8 < \lambda < 20$ см. С началом наблюдений на нем в нашей стране открылась возможность систематического исследования отдельных активных областей на Солнце.

Наиболее ценными при прочих сравнимых качествах являются наблюдения, дающие двумерное распределение интенсивности радиоизлучения по диску Солнца. Очевидно, что для этого удобнее антенные системы достаточно больших размеров в двух направлениях, сооружение которых, однако, связано со значительными инженерными трудностями.

Первые наблюдения, позволившие составлять карту радиоизлучения Солнца в сантиметровом диапазоне волн ($\lambda = 3,2$ и 10 см), были осуществлены в нашей стране в ФИАНе летом 1957 г. Использовалось неподвижное параболическое зеркало диаметром 31 м с подвижным облучателем [34]. В том же году двумерные карты Солнца на длине волны $\lambda = 20$ см начали составлять в Австралии. Сравнение полученных результатов для одних и тех же дней, проведенное на Парижском симпозиуме по радиоастрономии в 1958 г., показало, что подобные результаты дают ценную информацию о радиоизлучении активных областей на Солнце.

Во время упомянутых наблюдений в нашей стране уже велось строительство радиотелескопа РТ-22 ФИАН с большой угловой разрешающей способностью в миллиметровом и сантиметровом диапазонах волн. РТ-22 ФИАН вступил в строй в 1959 г. [35]. Это позволило приступить к изучению динамики активных областей на Солнце, поскольку система приводов радиотелескопа позволяла сопровождать Солнце в течение всего дня и вести непрерывное наблюдение.

Успешная эксплуатация РТ-22 ФИАН привела к строительству аналогичного радиотелескопа в КРАО АН СССР, завершившемуся в 1966 г.

С появлением результатов наблюдений на радиотелескопах БПР и РТ-22 можно считать законченным первый этап наблюдений радиоизлучения Солнца в нашей стране. В последующие годы к названным радиотелескопам добавились еще несколько, характеристики которых приведены в первой части этой книги. Подводя итоги первого этапа исследований радиоизлучения Солнца в СССР, можно отметить следующие важные результаты, полученные простыми средствами, и несмотря на это, обладавшие приоритетом, признанным как в нашей стране, так и за рубежом.

1. Определены размеры Солнца в радиодиапазоне и доказано наблюдением существование радиоизлучения его короны.

2. Открыто радиоизлучение "сверхкороны" Солнца и начато ее исследование.

3. Начаты измерения поляризации радиоизлучения активных областей на Солнце и выполнены первые наблюдения тонкой структуры таких областей.

4. Предложен способ определения величины магнитного поля по наблюдениям поляризации для случая тормозного излучения.

5. Получены спектры радиоизлучения конкретных активных областей.

Перечисленные результаты явились основой для понимания физических процессов, развивающихся в солнечной атмосфере, и их теоретического обоснования.

4.2. Свойства основных компонент радиоизлучения Солнца

Невозмущенное Солнце. В настоящее время Солнце принято считать "невозмущенным" (или "спокойным"), если на его видимом диске отсутствуют какие-либо активные образования (пятна, поры, волокна, флоккулы и т.д.). Понятие "невозмущенное" Солнце является, конечно, идеализацией, поскольку практически такая ситуация на Солнце не реализуется. Кроме того, нельзя исключать возможность существования таких активных образований, которые нам пока неизвестны.

Если доступно исследование отдельных участков невозмущенного солнечного диска, то в этом случае говорят о невозмущенных областях Солнца, находящихся вне активных образований.

Как было показано расчетами и подтверждено наблюдениями солнечного затмения в 1947 г. (см. выше), наблюдатель на Земле регистрирует радиоизлучение, главная часть которого возникает в тем более высоких слоях солнечной атмосферы, чем длиннее волна, на которой ведется наблюдение. Следовательно, измерение "радиодиаметра" Солнца, распределение интенсивности радиоизлучения по его диску и ее зависимость от длины волны (распределение по высоте) дают ценную информацию о строении солнечной атмосферы. Такие наблюдения в нашей стране были успешно выполнены несколькими независимыми способами.

Под руководством А.П. Молчанова была проведена серия наблюдений солнечных затмений с целью измерить "радиодиаметр" Солнца и проследить его изменение с фазой цикла солнечной активности и с длиной волны [36]. В этих измерениях было отмечено, что с ростом длины волны увеличение радиодиаметра в области сантиметровых волн ($4 < \lambda < 10$ см) замедляется [36]. Была также указана возможная причина расхождения результатов, полученных различными методами, связанная с тем, что распределение интенсивности радиоизлучения на лимбе Солнца имеет сложный характер и результат расчета радиодиаметра зависит от определения последнего.

Независимо от результатов, полученных во время затмений, обработка длинных рядов измерений на радиотелескопе БПР позволила установить, что радиорadius невозмущенного Солнца, определенный как расстояние от центра диска до точки, где яркость уменьшается в 2 раза, составляет $1,02 R_{\odot}$ на длине волны 2,0 см и постепенно возрастает с ростом λ до значения $1,1 R_{\odot}$ на длине волны 9,0 см.

Введение в строй РАТАН-600 не только подтвердило эти результаты, но и позволило изучать тонкие спектральные эффекты, например плавный рост радиодиаметра с длиной волны в диапазоне 2–4 см [37].

Распределение яркости радиоизлучения по спокойному Солнцу представляло интересную задачу в связи с представлениями о тормозном тепловом механизме радиоизлучения спокойного Солнца [2, 3], из которых следовал вывод о наличии яркого узкого кольца за лимбом, связанного с ростом температуры с высотой в атмосфере Солнца и "удвоением" оптической толщины короны при выходе за пределы непрозрачного лимба Солнца (хромосферы). Однако большая часть измерений во время солнечных затмений с помощью обычных малых антенн не дала определенного результата из-за того, что восстановление распределения яркости по диску

из затменной кривой дает весьма неустойчивое решение, сильно зависящее от небольших флуктуаций сигнала на записи хода затмения.

Более тщательные наблюдения отметили небольшое "уярчение" на диске Солнца с провалом" у его края на наиболее коротких волнах [38]. Наконец, наблюдения солнечных затмений, проведенные с применением специально сконструированного в ГАО для этой цели радиоинтерферометра с малой базой (около 130 λ) [39], а также использование результатов, полученных на радиотелескопе РТ-22 [40], не подтвердили наличия яркого узкого кольца за оптическим диском Солнца в сантиметровом диапазоне, а указали на то, что небольшое уярчение ($\sim 10\%$) имеет место лишь в пределах диска, а сам диск на несколько процентов больше оптического. Природа расхождения результатов наблюдений с предсказаниями теории, основывавшейся на сферически-симметричном распределении параметров солнечной атмосферы, как предполагается, связана с принципиальной необходимостью учитывать неоднородность солнечной атмосферы — вторжение холодных "языков" хромосферы (спикул) в область горячей короны [39—41].

Вне затмений длительный цикл наблюдений с высокой угловой разрешающей способностью на радиотелескопе БПР [37, 42] охватил почти ежедневными записями весь XX цикл солнечной активности. Просмотр нескольких тысяч записей позволил найти записи, соответствующие участкам Солнца, свободным от активных образований, практически для всех фаз солнечной активности. Результатом явилось установление двух интересных фактов: 1) распределение яркости по спокойному Солнцу не меняется с фазой цикла солнечной активности [42]; 2) на длине волны 3,2 см отсутствует сколько-нибудь заметное уярчение [37]. Анализ, проведенный для других волн сантиметрового диапазона, показал, что уярчение начинает появляться на более длинных волнах начиная с 4,5—6 см. Последний результат согласуется с данными наблюдений на крупнейших радиотелескопах: 100-метровом Боннском [43] и интерферометре в США [44].

Для более длинных волн (50 см и 1 м) наблюдения показали, что Солнце имеет форму эллипса, а повышение яркости имеет место на расстоянии $0,65 R_{\odot}$. Для объяснения полученного результата была предложена модель внутренней короны Солнца с температурным градиентом [45].

Исследования распределения яркости по диску "спокойного" Солнца, выполнявшиеся на радиотелескопе РТ-25Х2 в диапазоне более коротких волн (1—4 мм), показали, что в коротковолновой части этого диапазона наблюдается потемнение к краю в области, близкой к солнечному лимбу, а на длине волны 4 мм вместе с потемнением обнаружен эффект слабого уярчения на самом лимбе [46, 47]. В 1974 г. на РТ-22 КрАО в миллиметровом диапазоне волн обнаружен эффект уярчения в области северного и южного полюсов солнечного диска [48] (рис. 4.1).

Наблюдения на полноповоротном радиотелескопе ТНА-1500, выполнявшиеся на длинах волн 5,2 и 8,1 см [49], показали, что уярчение на полюсах переменное, изменяется от дня ко дню, а отличие радиодиаметров Солнца на двух волнах мало ($\sim 0,003$ — $0,004$).

Определения интенсивности излучения невозмущенного Солнца на коротких волнах 0,74—20 мм выполнялись в 1960—1970 гг. методом сравнения с радиоизлучением Луны [50—54]. Было установлено, что в интервалах

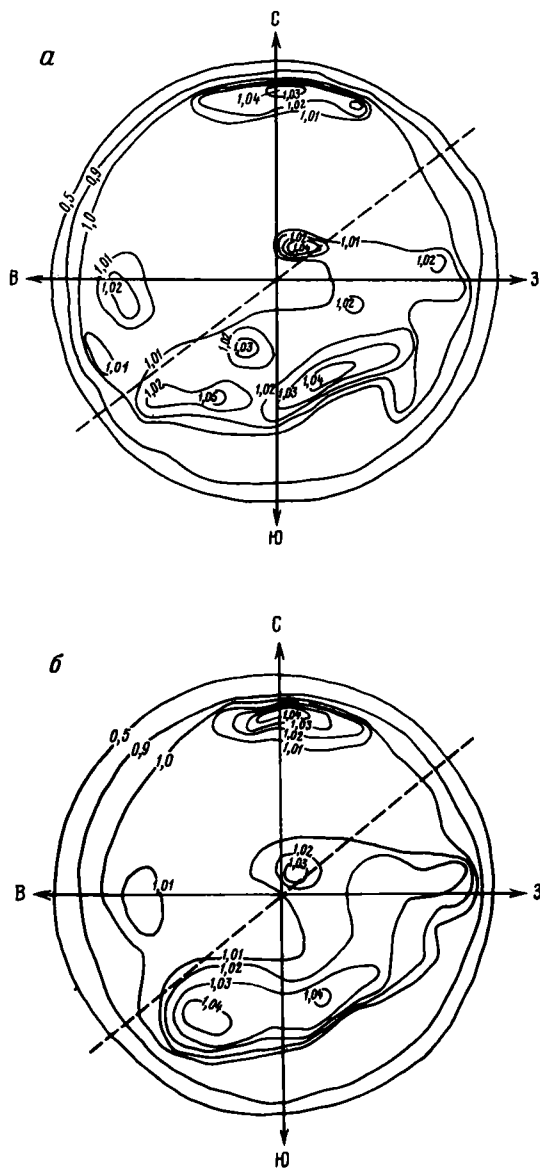


Рис. 4.1. Радиоизображение Солнца, полученное на РТ-22 КрАО на длинах волн 8 мм (а) и 13,5 мм (б) 24.09.79 г.

К Земле повернут северный полюс ($B_0 = 7^\circ$), у которого отчетливо заметно уярчение

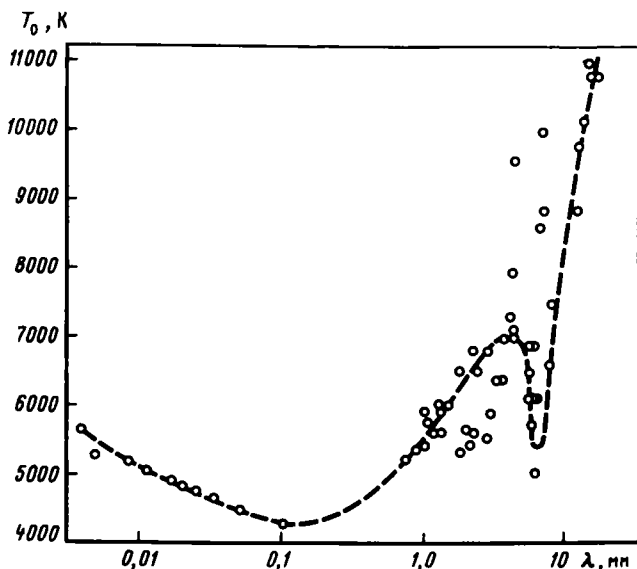


Рис. 4.2. Спектр спокойного Солнца в миллиметровом, субмиллиметровом и инфракрасном диапазонах волн

длин волн 1–4 и 8–20 мм спектр радиоизлучений Солнца характеризуется постоянными спектральными индексами, в то время как в области 6 мм наблюдается резкое уменьшение спектрального индекса. Полученный спектр хорошо согласуется с общепринятыми моделями нижней хромосферы Солнца, базирующимися на оптических и радиоданных (рис. 4.2).

На более длинных волнах ($2,93 < \lambda < 3,30$ см) наблюдения, проводившиеся с 1969 по 1971 г. как вне, так и во время затмения на радиотелескопе РТ-22, позволили установить, что спектральный индекс n радиоизлучения невозмущенных областей солнечного диска ($F = F_0 f^n$) оказался близким к единице, а за три года его изменения не были обнаружены [55].

В 1975 г. по инициативе Л.Л. Базеляна, В.В. Зайцева и В.О. Рапопорта на базе харьковской антенны УТР-2 создан двумерный 40-лучевой радиогелиограф на частоте 25 МГц, который в то время был крупнейшим радиогелиографом декаметрового диапазона (ширина каждого луча $25 \times 25'$). На этом инструменте были получены первые двумерные радиоизображения спокойного Солнца на длинных волнах, показавшие резко асимметричную структуру внешних слоев солнечной короны [56].

В последние годы предметом интенсивного исследования стали пространственные флуктуации яркости по диску Солнца, которые получили название "радиогрануляции". Снимки Солнца в линии водорода H_α показывали чрезвычайно богатую деталями структуру солнечной хромосферы на диске, что и наталкивало на поиски проявления таких же неоднородностей в радиодиапазоне.

Первое обнаружение радиогрануляции было, по-видимому, сделано в КраО на РТ-22 [57] "затменным" методом при покрытии диска Солнца Меркурием (9.05.70 г.). При слежении за его прохождением по диску Солн-

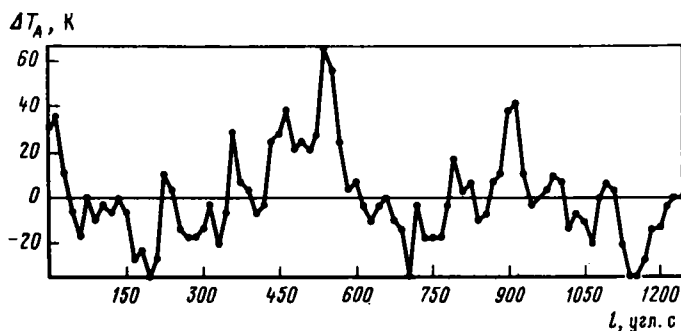


Рис. 4.3. Запись радиоизлучения (отклонение от среднего уровня) на длине волны 8 мм при прохождении Меркурия по участку диска Солнца 9.05.70 г. (d - угловой диаметр Меркурия, равный $12''$)

ца на длине волны 8 мм были обнаружены флуктуации сигнала, спектральный анализ которых позволил выявить несколько характерных масштабов неоднородностей в распределении радиояркости по диску спокойного Солнца (рис. 4.3).

Радиогрануляция на коротких миллиметровых волнах 1,4 и 4,1 мм была обнаружена также на РТ-25 [58], а в сантиметровом диапазоне — в США на трехэлементном интерферометре.

В мае 1975 г. с помощью РАТАН-600 были обнаружены флуктуации яркости участков спокойного Солнца в диапазоне 2–4 см [59]. Эффект был слабый — колебания сигнала составляли десятые и сотые доли процента так что для регистрации были применены специальные методы [60]. Характерный пространственный масштаб радиогрануляции свидетельствовал с ее вероятной связи с хромосферной сеткой.

Для получения прямого оптического отождествления деталей радиогрануляции летом 1976 г. была организована специальная оптическая экспедиция ГАИШ, установившая на площадке РАТАН-600 небольшой телескоп с интерференционным поляризационным фильтром на линию ионизованного кальция. Результатом совместных наблюдений (была выбрана самая короткая волна, на которой мог работать РАТАН-600 — 1,3 см) явилось прямое оптическое отождествление отдельных радиогранул (темных и светлых) с деталями хромосферной сетки [61]. Заметим, что проблема оптического эквивалента радиогранул еще обсуждается в мировой литературе. Сегодня нельзя исключить, что существуют радиогранулы с разными оптическими отождествлениями. Во всяком случае, радиогрануляция — то новое явление, наблюдаемое в радиоизлучении Солнца, дающее ценную информацию о структуре и физических процессах в солнечной атмосфере.

Кроме изучения "пространственной" структуры солнечного радиоизлучения, были начаты исследования флуктуаций радиоизлучения во времени. Первые наблюдения флуктуаций радиоизлучения Солнца в нашей стране проводились в НИРФИ О.И. Юдиным [62] под руководством М.М. Кори́на. Результатом этой работы явилось обнаружение в потоке излучения ряда доминирующих периодов в диапазоне от нескольких минут до 10–20 мин. Колебания, казалось, присутствуют постоянно, хотя их амплитуда

возрастала с ростом уровня солнечной активности. В интерпретации делались попытки связать наблюдаемые колебания с известными пятиминутными колебаниями, обнаруженными Р. Лейтоном в поле скоростей оптическими методами. Однако вопрос о существовании в суммарном потоке радиоизлучения доминирующих периодов в упомянутом выше диапазоне до сих пор остается открытым (см., например, работу [63]).

В дальнейшем при наблюдении на радиотелескопах с высоким угловым разрешением стали определять флуктуации радиоизлучения отдельных невозмущенных областей солнечного диска. Впервые такие измерения были проведены на радиотелескопе РТ-22 на длине волны 0,8 см [64]. Впоследствии, однако, выяснилось [65], что из-за сильного влияния земной атмосферы получить достоверные результаты по флуктуациям излучения невозмущенных участков Солнца на длинах волн 0,8 и 1,35 см на РТ-22 не удастся. В упомянутой работе было показано, что верхняя оценка амплитуды флуктуаций излучения с характерным временем изменения порядка нескольких минут не превосходит 1% от уровня излучения спокойного Солнца. В дальнейшем такие измерения проводились на волне $\lambda = 3,2$ см, где влияние земной атмосферы существенно меньше [66]. Было показано, что амплитуда флуктуаций радиоизлучения составляет около 0,3–0,4%. Близкая оценка (0,5%) впоследствии была получена и при наблюдении на Боннском радиотелескопе на $\lambda = 2,8$ см [67].

С помощью БПР и РАТАН-600 были исследованы также проявления корональных "дыр" в сантиметровом и дециметровом диапазонах, которые рассматриваются в настоящее время как возможные источники высокоскоростных потоков плазмы в солнечном ветре. При прохождении "дыры" по диску Солнца эффект, как и можно было ожидать, невелик и дефицит радиояркости не превосходит нескольких процентов. Однако существование корональной "дыры" на лимбе отчетливо проявляется как заметное уменьшение радиодиаметра Солнца [68].

Медленно изменяющаяся составляющая радиоизлучения Солнца. Суммарное радиоизлучение. Первые исследования медленно изменяющейся оставляющей (или S -компоненты) радиоизлучения Солнца в нашей стране основывались на наблюдениях суммарного потока от всего солнечного диска. Была отмечена тесная связь этой величины с параметрами оптических образований на солнечном диске, сформулированы соответствующие математические выражения [69, 70], усовершенствованные в дальнейшем.

Исследования отдельных активных областей, радиоизлучение которых формирует рассматриваемую составляющую, и физические интерпретации полученных результатов имеют поучительную историю. Со времени работы М. Вальдмайера и Х. Мюллера в 1950 г. [71] было принято рассматривать S -компоненту как тормозное излучение материи корональных конденсаций активных областей Солнца. При этом игнорировались результаты, полученные австралийскими исследователями, показавшими, что суммарный спектр всей составляющей не может интерпретироваться тормозным излучением, так как имеет место четко выраженный спад потока в сторону коротковолновой части сантиметрового диапазона (интерпретация Вальдмайера базировалась на наблюдениях Ковингтона в Канаде, выполненных на одной длине волны 10,7 см). Австралийские радиоастрономы предложили привлечь для интерпретации тепловое магнитотормозное излучение ко-

Рис. 4.4. Распределение общего потока (а) и круговой поляризации (б) излучения на длине волны 10,6 см группы пятен № 11

б: левая поляризация (верхняя часть рисунка) соответствует южной полярности магнитного поля

роны в сильном магнитном поле пятна, но вследствие отсутствия развитой теории они не учли возможности излучения на более высоких, чем первая, гармониках гирочастоты, в силу чего найденные ими параметры области излучения оказались маловероятными. Возникшее в дальнейшем понимание природы S-компоненты было связано с работами советских радиоастрономов.

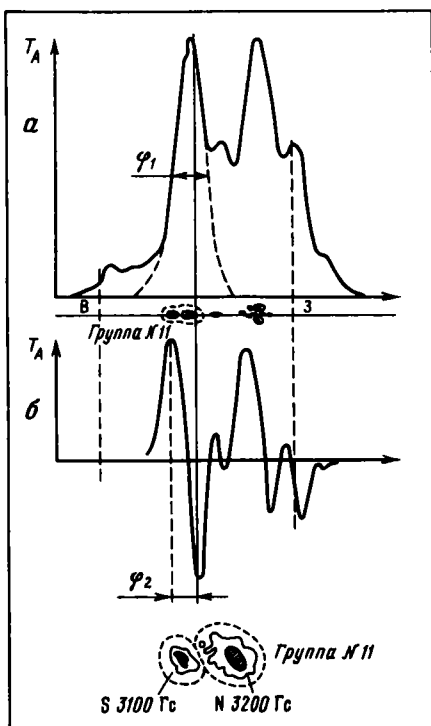
Активные области, связанные с группами пятен и флоккулами. Существенный шаг в исследованиях S-компоненты был сделан путем наблюдений отдельных активных областей и в результате формулировки теории, объясняющей полученные результаты.

В ГАО были выполнены наблюдения, обнаружившие, что поляризованная по кругу составляющая радиоизлучения проявляется только тогда, когда большая группа пятен находится вблизи центрального меридиана. Знак поляризации соответствовал избытку необыкновенной волны [70] (рис. 4.4).

В наблюдениях затмения 2.12.56 г. были проведены поляризационные измерения, которые показали, что область поляризованного излучения не только по положению совпадает с большим пятном, но и имеет размеры ($\sim 0,5'$), меньшие размеров группы пятен и близкие к размеру тени пятна; в радиоизображении группы имеются детали [11].

На БПР наблюдения Солнца были начаты 22.12.56 г. на длине волны 3,2 см. Эти наблюдения показали [72], что в локальных источниках солнечного радиоизлучения имеются небольшие детали — размером около $1'$, т.е. много меньше размеров активных областей. Н.С. Соболевой были разработаны основы интерпретации наблюдений конденсаций в присутствии магнитного поля [73]. В частности, ею было показано важное свойство решений уравнения переноса, позволяющее измерять магнитные поля также и в случае тормозного излучения в оптически толстом слое. Все эти работы не потеряли значения и сейчас, хотя часто применялись к объектам другой природы (источникам магнитотормозного излучения над пятнами).

Пулковские наблюдения первых лет также трактовались как тепловое тормозное излучение корональных конденсаций в полном соответствии



с тенденциями мировой научной литературы того времени. Радикальное изменение взглядов на природу радиоизлучения активных областей было связано с успехами теории, позволившими предложить удовлетворительное объяснение экспериментальных данных.

В 1962—1963 гг. появляются работы В.В. Железнякова [74, 75], в которых было показано, что для интерпретации спектра радиоизлучения локального источника наряду с тормозным следует учитывать также тепловое циклотронное излучение корональных электронов на второй и третьей гармониках гирочастоты. Совместный анализ наблюдений локальных источников на ряде интерферометров в Японии, США и Канаде [76, 77] также показал неадекватность спектра локального источника только лишь тормозной модели радиоизлучения. В последующие годы Е.Я. Злотник [78] рассчитала первую детальную двухкомпонентную модель локального источника, в которой учитывается как тормозной, так и магнитотормозной механизм излучения.

Обработка результатов наблюдений в 1958 г. показала, что сопоставление затменных кривых с оптическими данными привело к завышенным оценкам высот областей генерации радиоизлучения [79]. Спустя несколько лет анализ всех возможных оптических наблюдений исследовавшейся группы пятен и тщательное измерение по фотогелиограммам горной астрономической станции ГАО в г. Кисловодске координат основных элементов структуры группы позволили выяснить, что радиоизображение источника в поляризованном излучении повторяет во всех деталях структуру группы на фотосфере, не обнаруживая сколько-нибудь заметного смещения, которое можно было бы приписать эффекту проекции высоты [80]. Отсюда был сделан вывод, что высота источника не может превышать 3000 км. Этот результат был подтвержден в большой серии последующих исследований.

При наблюдении затмения 1958 г. на длине волны 2 см не удалось (по крайней мере с погрешностью до 1%) обнаружить излучение локального источника над пятнами ни в "канале интенсивности", ни в "канале поляризации". В то время это обстоятельство явилось поводом к поискам всевозможных источников ошибок. Только спустя шесть лет, когда были начаты наблюдения на БПР на пяти длинах волн в диапазоне от 2 до 9 см, стало ясным, что слабое (по сравнению с диапазоном 3 см) излучение на длине волны 2 см является весьма обычным свойством спектров излучения локальных источников средних и больших солнечных пятен [80].

В 1964 г. после реконструкции БПР, улучшения качества его поверхности и методов юстировки под руководством Г.Б. Гельфрейха были начаты систематические наблюдения Солнца, причем число длин волн было доведено до пяти (2,0, 3,2, 4,4, 6,6 и 9,0 см); наряду с интенсивностью регистрировалась круговая поляризация. Эти работы показали, что спектры излучения локального источника весьма разнообразны: они часто имеют "плато", максимумы на отдельных волнах, а величина потока излучения в таком узком диапазоне, как 2—3 см, часто возрастает в десятки раз [80]. В результате многолетней работы были исследованы законы развития локального источника и их статистические свойства [80, 81]. Были выявлены новые свойства изменения поляризации, определяемые условиями распространения. Известное ранее свойство локальных источников менять

знак поляризации было исследовано во всем сантиметровом диапазоне; было показано, что смена знака поляризации начинается с более длинных волн, а кривые изменения поляризации несимметричны относительно прохождения центрального меридиана источником. Кроме того, было выяснено, что обнаруженная в 1956 г. высокая направленность излучения локального источника связана с "замытием" поляризации в квазиперечных магнитных полях короны. Главное же, был практически разработан новый метод измерения магнитного поля в короне на высотах порядка 100 тыс. км и показано, что поля здесь не отличаются значительно от потенциальных [82]. В результате исследований [83] на волне 9 см, где поляризация вообще считалась низкой, было обнаружено, что в этом диапазоне степень поляризации растет с уменьшением размера пятна (это говорит о чувствительности диапазона к малым напряженностям коронального поля).

В программе регулярных наблюдений Солнца на БПР, в частности на самой короткой волне $\lambda = 2$ см, принимала участие АО ЛГУ [84].

На основе анализа радиоизображений десятков локальных источников были получены наиболее важные заключения о многокомпонентности их структуры. Были установлены следующие основные компоненты: 1) ядра локальных источников расположены прямо над пятнами, повторяя их очертания (размеры близки или чуть меньше размеров ядер пятен), сильная поляризация, доходящая до 100% в коротковолновой части спектра, резко растущий с длиной волны спектр яркостных температур от нескольких сот до нескольких миллионов градусов; 2) флоккульный компонент — малой интенсивности, слабо поляризован, имеет размеры порядка флоккульных полей активной области; 3) "гало" — излучение, заполняющее пространство между пятнами, иногда несколько превосходящее размеры группы, поляризация слабая, для волн короче 5 см спектр, как правило, плоский (тормозное излучение корональных конденсаций), на более длинных волнах, однако, поток растет, свидетельствуя, возможно, о не-тепловой природе этого радиоизлучения.

Исследования S -компоненты спорадического радиоизлучения Солнца в диапазоне миллиметровых радиоволн проводились в основном на радиотелескопах РТ-22 вначале в ФИАНе, а затем в КРАО АН СССР. Первые наблюдения активных областей методом анализа "радиоизображений" в 8- и 4-миллиметровых диапазонах длин волн [85, 86] показали, что источники S -компоненты в 8-миллиметровом диапазоне длин волн являются оптически тонкими. Они могут быть представлены в виде двух компонент: малых угловых размеров ($1-2'$) над крупными группами пятен и более протяженных ($4-5'$) над флоккулами. Превышение яркостной температуры над уровнем спокойного Солнца достигает 10^4-10^6 К. Излучение многих источников поляризовано по кругу, что находится в соответствии с представлениями о значительном вкладе магнитотормозного механизма в радиоизлучение активных областей [87]. Дальнейшие исследования спектра S -компоненты в диапазоне длин волн 1–16 мм [88, 87] показали, что магнитотормозной механизм имеет преобладающее влияние в области $\lambda > 8$ мм.

В миллиметровом диапазоне были также выполнены исследования поляризованного по кругу радиоизлучения на длинах волн 8–13,5 мм в актив-

ных областях над группами пятен [90, 91]. Оказалось, что степень круговой поляризации резко зависит от длины волны и существенно изменяется при движении активной области по диску Солнца. Интенсивность в поляризованном излучении при этом на 1–2 порядка ниже, чем в интегральном. Затменные наблюдения [92] позволили выявить компоненты с размерами порядка 10–30".

Радиоизлучение Солнца на длине волны $\lambda = 1,6$ см исследовалось в работе [93]. В ней впервые приведены также в широком диапазоне волн спектральные характеристики радиоизлучения источников, связанных с флоккулами, и сделан вывод о небольшой толщине переходной области в этих источниках.

Наклон спектра радиоизлучения активных областей (при $\lambda = 3$ см) определялся (1969–1971 гг.) на радиотелескопе РТ-22 во время совместных наблюдений НИИФ ЛГУ и ФИАН. Было найдено, что спектральный индекс n для радиоизлучения флоккул обычно близок к нулю, а для групп пятен характерным значением явилось $n = 2,5 \div 3$ [94], что соответствовало теоретическим представлениям.

При проектировании РАТАН-600 и разработке его научной программы [95, 96] был учтен опыт многолетних исследований Солнца на БПР и посредством затмений. Так, первая очередь солнечного спектрально-поляризационного комплекса, созданного под руководством Б.М. Богода, включала пять поляризационных радиометров в диапазоне $\lambda = 2 \div 4$ см; разнесение соседних длин волн составляло всего 15%.

Такой выбор частотной сетки радиометров был сделан на основе обнаружения ранее на БПР характерного крутого участка спектра магнитотормозного излучения ядер локального источника в этом диапазоне. Действительно, уже первые наблюдения подтвердили, что характер радиоизображения локального источника на соседних длинах волн, даже столь близко расположенных, оказывается зачастую совершенно различным. Это позволило в сочетании с высоким пространственным разрешением развить и усовершенствовать методику диагностики плазмы, и в первую очередь магнитных полей в верхней хромосфере и короне, где они плохо измеряются оптическими методами. В частности, на основе предложенного [97] решения уравнения переноса была развита методика измерения слабых магнитных полей в хромосфере [98]. Заметим, что впервые этот метод удалось применить группе радиоастрономов [99, 100], использовавших наблюдения солнечного затмения 7.03.–70 г. на Кубе. Дальнейшее совершенствование метода определения величин магнитного поля по наблюдениям в радиодиапазоне путем учета существенной роли его неоднородности было выполнено в НИИФ ЛГУ [101].

Введение в строй крупнейших радиотелескопов значительно повысило угловое разрешение, что позволило изучать пространственную структуру локальных источников радиоизлучения и проводить ее отождествление с оптическими образованиями. В то же время исследования частотного спектра радиоизлучения активных областей в СССР и во всем мире по-прежнему проводились традиционными методами — путем измерений на дискретных частотах, причем частотное разрешение, как правило, не превышало $\Delta\omega/\omega \approx 1$. Это было обусловлено как техническими трудностями, так в значительной степени и теоретическими представлениями о структуре

активных областей и о механизмах генерации S -компоненты. Последнее хорошо объясняли результаты наблюдений, но не позволяли ожидать появления в спектре излучения каких-либо тонких структур. Сомнения в справедливости этого положения возникли в результате измерений "наклона спектра" радиоизлучения на длине волны 3,3 см во время наблюдений затмения Солнца 22.09.68 г. [102]. Дальнейшая работа по исследованию тонкой структуры спектра S -компоненты солнечного радиоизлучения проводилась в НИРФИ под руководством М.М. Кобрин. Первые эксперименты были поставлены в 1971 г. в диапазоне 6,2–7,2 ГГц с помощью радиометра с перестройкой частоты [103]. Последующие наблюдения на радиотелескопах РТ-22 ФИАН и КраО, позволяющих изучать спектральные характеристики отдельных локальных источников, показали, что структурные детали спектра проявляются на определенных стадиях развития активной области и изменяются в ходе ее эволюции [104], хотя в ряде других публикаций подобные утверждения оспаривались [105, 106].

Несмотря на то что существование тонкой структуры спектров радиоизлучения активных областей нуждается в подтверждении, теоретические расчеты допускают наличие такого эффекта. В.В. Железняков и Е.Я. Злотник показали возможность существования тонких структур частотного спектра S -компоненты радиоизлучения [107, 108]. Они рассмотрели ряд моделей распределения температуры и магнитного поля $T(h)$ и $B(h)$ в активных областях, обеспечивающих излучение со сложным спектром. Ими показана возможность регистрации отдельных циклотронных линий, а также высокочастотных уступов на гармониках электронной гирочастоты. Особый интерес представляет модель с токовым слоем, предложенная С.И. Сыроватским [109] и развиваемая его школой. Эта модель объясняет накопление "избыточной" магнитной энергии в активной области перед вспышкой и быстрое превращение этой энергии в потоки тепла и ускоренных частиц во время вспышки.

Радиоизлучение областей, связанных с протуберанцами. Интерес к проблеме связи радиособытий с активными протуберанцами за последние годы сильно возрос в связи с открытием транзиентов — мощных взрывных выбросов материи из Солнца. Радионаблюдения спокойных долгоживущих протуберанцев-волокон были выполнены на РТ-22 ФИАН впервые У.В. Хангильдиным [110]. Среди прочих результатов им были обнаружены депрессия радиояркости в районе волокон, свидетельствующая о том, что кинетическая электронная температура в волокнах ниже, чем в обычной хромосфере (альтернативная интерпретация состоит в образовании вокруг волокон разреженных полостей в солнечной короне). Одной из проблем исследования волокон является проблема соотношения их размеров в оптическом и радиодиапазоне. Хотя разрешение РТ-22 (приблизительно $2'$) недостаточно для построения изображения волокна, имеющего угловой размер порядка $10'$, в ряде случаев на этом радиотелескопе удалось обнаружить размер темной области на радиодиске Солнца шире оптического. Как следует из ряда последних исследований, это не является общим свойством всех волокон [111]. В какой степени образование таких "каверн" связано с протуберанцами — еще надлежит исследовать.

В заключение отметим, что с помощью РАТАН-600 удалось в ряде случаев зарегистрировать активные протуберанцы на значительных высотах

(120000 км) за лимбом оптического диска [111] и измерить такие их параметры, как электронная температура (20000 К), градиент температуры, магнитное поле.

Значительный материал, полученный при наблюдениях радиоизлучения Солнца на больших радиотелескопах, позволил исследовать связь между состоянием активной области и вероятностью появления в ней вспышки. Здесь следует отметить работу [112] по усовершенствованию критерия Танаки—Эноме, в которой выполнен анализ изменения пространственного распределения поляризаций радиоизлучения активной области по наблюдениям на БПР.

В этом направлении предстоит, однако, еще много сделать, так как ранее существовавшие представления оказались ненадежными: в частности, было показано, что связь вспышек с большими группами пятен определяется не только параметрами самих групп пятен, но и сравнительно слабыми магнитными полями, ранее причислявшимися к "фоновым полям" [113].

Флуктуации медленно изменяющейся составляющей радиоизлучения Солнца. Новые возможности изучения процессов, происходящих в солнечной атмосфере, дают исследования флуктуаций радиоизлучения Солнца, существование которых можно было предположить, например, исходя из упоминавшегося уже обнаружения в 1962 г. Лейтоном 5-минутных колебаний в фотосфере. Успехи оптической астрономии в изучении колебательных процессов в солнечной атмосфере вдохновили радиоастрономов на поиск аналогичных колебаний в потоке радиоизлучения Солнца. Впервые в СССР такие работы были начаты в НИРФИ в 1963 г. в диапазоне 3 см [62, 64]. Малость ожидаемого эффекта и неизбежность влияния земной атмосферы, нестабильность аппаратуры и т.п. потребовали разработки специальной методики измерений.

Указанные работы послужили началом большой программы исследований, проводившихся в НИРФИ. В 1967—1968 гг. была разработана и осуществлена методика квази нулевых измерений флуктуаций поляризации, наклона спектра (разности потоков на двух близких длинах волн) и проведены наблюдения со сканированием диаграммой направленности. Диапазон длин волн, в котором изучались флуктуации, был расширен от 8 мм до 30 см [111]. На следующем этапе (с 1969 г.) большое внимание уделялось попытке выявить колебания с большим характерным временем (порядка 1 ч).

Для получения максимальной достоверности данных о долгопериодных флуктуациях в 1971 г. были проведены наблюдения в двух пунктах, разнесенных на расстояние, превышавшее 1000 км. Была показана реальность существования "квазипериодических"⁵ компонент (КПК) флуктуаций радиоизлучения Солнца с периодами от десятков секунд до 3 ч. При этом основная часть КПК представляет собой отдельные цуги колебаний с изменяющимися периодами. Специальные исследования достоверности и точности выделения КПК, включающие исследования функций коге-

⁵ Термин "квазипериодические колебания (компоненты)" в публикациях не определяется и не является общепринятым. В ряде статей в аналогичных случаях используется фраза "пульсации с характерным временем...". Во избежании путаницы сохранены термины авторов цитируемых публикаций.

рентности записей радиоизлучения Солнца, показали, что при наблюдениях в одном пункте, даже с использованием специальных мер обработки, часть наблюдаемых квазипериодических флуктуаций имеют несолнечное происхождение. В то же время эпизодическое присутствие КПК в солнечном излучении не вызывает сомнения.

Следует отметить, что результаты наблюдений флуктуаций из-за сложности самих явлений весьма противоречивы и многое остается неясным до последнего времени. Это касается не только данных наблюдений, но и многочисленных теоретических работ, в которых авторы пытались объяснить наблюдаемые эффекты модуляцией радиоизлучения различными типами волн, эволюцией магнитных полей, резонансами в различных образованиях на Солнце и неустойчивостями [112–116].

Несмотря на неясность многих вопросов, обнаружение и изучение низкочастотных пульсаций радиоизлучения с характерными временами от секунд до нескольких часов, в отдельных случаях принимающих квазипериодический характер, имеют, несомненно, важное значение.

Независимо от работ, выполненных в НИРФИ, из анализа наблюдений в ГАО на БПР было обнаружено, что локальные источники медленно меняющейся компоненты радиоизлучения Солнца могут быть разделены на две группы: с относительно стабильным потоком (в диапазоне 9 см) и сильно флуктуирующим. Последняя группа источников оказалась связанной с областями с высокой вспышечной активностью [117].

Для аналогичных задач в СиБИЗМИРе в Иркутске был создан радиоинтерферометр с малой базой (РИМБ) на длину волны 3,5 см. Элементами интерферометра служили два участка одного вытянутого параболического зеркала, облучаемые отдельно [118]. В 1971 г. на РИМБ был проведен цикл совместных длинных рядов наблюдений ГАО и СиБИЗМИРом. Результатом явилось дальнейшее подтверждение изменчивости амплитуд и периодов КПК с периодами 10–15 мин. В последующих работах [119] было показано, что колебания, близкие к периодическим, возникают на протяжении сравнительно небольших промежутков времени — нескольких часов с тенденцией повторения на одних и тех же частотах (различных для разных активных областей) [61]. Была обнаружена [120] связь роста амплитуд флуктуаций потока излучения локального источника с всплыванием новых магнитных потоков на поверхность Солнца. В СиБИЗМИРе были выполнены также исследования КПК поляризованного потока на длине волны 3,2 см [121] и обнаружено возрастание колебаний с периодами около 7 мин при росте вспышечной активности.

В 1979 г. сотрудники КраО АН СССР сообщили об обнаружении на длине волны 1,35 см строго периодических колебаний с периодом 2 ч 40 мин [122], связанных с оптически наблюдаемыми в поле скоростей на уровне фотосферы колебаниями того же периода, открытыми А.Б. Северным.

Исследования флуктуаций в дециметровом диапазоне длин волн были продолжены в Радиоастрономической обсерватории АН ЛатвССР [123]. В отделе радиоастрономии ГАО для этой цели был использован РИМБ [124, 125], который позволил практически полностью избавиться от влияния земной атмосферы на измеряемый сигнал и тем самым исключить наиболее важный источник помех. Исследованиями были подтверждены наличие КПК на длине волны 4 см с периодами 10–15 мин и их изменение

со временем. При этом была установлена связь флуктуаций с наличием активных областей на Солнце.

В целях расширения диапазона исследований флуктуаций солнечного радиоизлучения в 1972–1973 гг. были проведены наблюдения в дециметровом [124, 125], а в 1975–1976 гг. — в дециметровом диапазоне волн (НИРФИ совместно в РИАН УССР) на радиотелескопе УТР-2 [126], позволившие определить скорости распространения возмущений, вызывающих наблюдаемые флуктуации радиоизлучения Солнца [127, 128].

В дальнейшем, начиная с 1980 г., исследование флуктуаций радиоизлучения активных областей на Солнце стало проводиться и на радиотелескопе ТНА-1500 ОКБ МЭИ (с участием ОКБ МЭИ, ИПГ и НИИФ ЛГУ) при $\lambda = 7,7$ и 3,6 см с измерением интенсивности и поляризации. Как правило, такие наблюдения проводились одновременно с соответствующими наблюдениями на РТ-22 ФИАН [129]. Одновременные наблюдения флуктуаций на двух крупнейших полноповоротных радиотелескопах СССР в широком диапазоне волн с измерением интенсивности и поляризации радиоизлучения позволили установить, что изменения радиоизлучения в сантиметровом диапазоне волн, по-видимому, вызываются изменениями магнитных полей активных областей.

Все упомянутые наблюдения позволили установить связь характеристик флуктуаций активных областей. Так, по наблюдениям августовских событий в 1972 г. было замечено перед вспышками усиление флуктуаций радиоизлучения (этот результат был подтвержден и при последующих наблюдениях).

Наблюдения на $\lambda = 3,2$ см обнаружили увеличение общей энергии пульсаций с характерным временем изменения больше 5 мин [130], а наблюдения, проведенные на волне 3,1 см, показали, что этим вспышкам предшествовали квазипериодические пульсации в наклоне спектра большой амплитуды, хорошо видные прямо на записи (периоды 20–85 мин) [129] на больших и малых антеннах [81].

Проявления предвспышечных процессов были обнаружены также и в пульсациях H -компоненты магнитного поля Земли (по данным нескольких геомагнитных станций, разнесенных по долготе и широте), коррелирующих с пульсациями радиоизлучения Солнца [131, 132]. Это обстоятельство можно рассматривать как свидетельство существования аналогичных пульсаций в рентгеновском и ультрафиолетовом излучении Солнца [133].

Анализ результатов наблюдений наклона спектра радиоизлучения активных областей в 3-сантиметровом диапазоне показал, что характер флуктуаций наклона спектра зависит от структуры магнитных полей активных областей и для некоторых из них обусловлен их вспышечной активностью [134, 135].

Всплески радиоизлучения Солнца. Всплески радиоизлучения в значительной мере связаны с наиболее яркой и энергичной формой солнечной активности — вспышками и, более того, могут рассматриваться наряду с рентгеновскими всплесками как наиболее характерное их проявление. Наблюдения радиовсплесков в широком диапазоне длин волн позволяют диагностировать ускорение частиц и нагрев плазмы во вспышке, выброс быстрых частиц в межпланетную среду или удержание их в магнитных ловушках в пределах короны, образование в солнечной атмосфере ударных волн.

Значительные успехи в изучении всплесков радиоизлучения достигнуты в нашей стране в области их теории. Поэтому в разд. 4.2 вначале рассмотрены результаты теоретических исследований различных типов всплесков. Первые идеи о плазменном механизме, ответственном за значительную часть событий в метровом диапазоне волн, высказаны И.С. Шкловским [136] и В.Л. Гинзбургом [137]. Однако они натолкнулись на трудности, так как сами по себе плазменные волны в однородной среде не порождают поперечной электромагнитной волны, способной распространяться в свободном пространстве. Эта трудность была преодолена в последующих исследованиях В.Л. Гинзбурга и В.В. Железнякова [138, 139], которые показали, как учет неоднородности среды и нелинейные эффекты в плазме приводят к генерации наблюдаемых радиовсплесков на плазменной частоте и ее второй гармонике. Использование методов современной физики плазмы характерно для школы, развившейся в Горьком под руководством Железнякова и оказавшей существенное влияние на высокий уровень теоретических исследований в солнечной радиоастрономии в СССР. Усилиями Железнякова и представителей этой школы внесен значительный вклад в создание теории спорадического радиоизлучения Солнца.

Микроволновое радиоизлучение вспышки. По современным представлениям, первичное энерговыделение вспышки происходит в компактных ($\sim 10^4$ км) корональных магнитных арках, называемых вспышечными петлями. Энерговыделение приводит к быстрому нагреву плазмы и к ускорению протонов и электронов до больших энергий. Горячая (с температурой $\sim 10^7$ – 10^8 К) плазма вспышечных петель, содержащая энергичные частицы, является источником интенсивного рентгеновского и гамма-излучения. Для диагностики параметров области энерговыделения и понимания происходящих при вспышке физических процессов крайне необходимы модели микроволнового радиоизлучения вспышки.

В работе [140] было исследовано тепловое тормозное и циклотронное радиоизлучение области первичного энерговыделения и показано, что при сравнительно небольших магнитных полях $B \approx 200$ Гс и при плотности плазмы $n \approx 10^{12}$ см $^{-3}$ основной вклад в излучение дает тормозной механизм. Максимум яркостной температуры соответствует плазменной частоте электронов. При больших полях ($B \approx 400$ Гс) и меньших плотностях ($n \approx 10^{11}$ см $^{-3}$) преобладает магнитотормозное излучение, а спектр излучения должен состоять из ряда полос. Сотрудники ЛГУ [141, 142] развили модель всплеска, генерируемого энергичными электронами со степенной функцией распределения. При этом учитывалось влияние окружающей плазмы и неоднородностей на эффективность излучения. Влияние физических условий в источниках микроволновых всплесков на частотный спектр некогерентного излучения электронов с энергией 20–200 кэВ исследовано в [142, 143]. В [144] показано, что интенсивное, с яркостной температурой $T_{\text{я}} \gtrsim 10^{10}$ К микроволновое излучение "элементарных" вспышечных всплесков, из которых состоит импульсная фаза вспышки, может быть связано с развитием во вспышечных петлях конусной неустойчивости плазменных волн, которые трансформируются в электромагнитные. Не исключено, что нелинейный колебательный режим конусной неустойчивости плазменных волн является причиной короткопериодических (10^{-2} – 10^{-3} с) пульсаций микроволнового радиоизлучения [145].

Во время импульсного энерговыделения, когда горячая плазма начинает заполнять вспыхивающую петлю, в ней формируется температурный переходный слой — область большого градиента температуры и концентрации плазмы, которая распространяется в глубь хромосферы [146]. Этот процесс ярко проявляется в радиоизлучении вспышки. На основе тепловой модели радиовсплесков в [147] было рассчитано временное поведение интенсивности и поляризации, определяемое изменением оптических толщин плазмы относительно тормозного и магнитотормозного излучения.

Выделившееся при вспышке тепло может переноситься в короне ударной или тепловой волной. В работах [148, 149] показано, что в результате появляются две группы всплесков с квазитепловым спектром. Всплески первой группы, для которых существенно влияние поглощения излучения, формируются при достижении ударной волной оптических толщин порядка единицы. Всплески второй группы связаны только с импульсным характером самого источника.

В работах [140–149] нашло отражение большое разнообразие наблюдаемых характеристик микроволновых радиовсплесков. Эти работы, несомненно, способствуют созданию адекватной физической модели радиоизлучения солнечных вспышек.

Радиоизлучение энергичных частиц и ударных волн. Ускоренные во вспышке частицы, распространяясь вдоль открытых силовых линий магнитного поля, генерируют всплески радиоизлучения III типа. Часть частиц захватывается в ловушечные конфигурации магнитного поля и приводит к широкополосному радиоизлучению, наиболее характерным видом которого являются всплески IV типа. Ударные волны, распространяясь в короне и межпланетной среде, генерируют всплески II типа. Потоки энергичных частиц и ударные волны оказывают заметное влияние на состояние ионосферы Земли и околоземного космического пространства. Поэтому исследование их радиоизлучения, в наиболее развитой форме появляющегося в метровом и декаметровом диапазонах, имеет не только научное, но и практическое значение.

Если излучение в дециметровом, сантиметровом и миллиметровом диапазонах обусловлено в основном некогерентными механизмами излучения, то в метровом и декаметровом диапазонах наиболее распространен когерентный плазменный механизм. Он предполагает, что ударные волны и потоки частиц вызывают неустойчивости потенциальных плазменных волн. Затем эти волны трансформируются в электромагнитные, которые выходят из источника. Мощность излучения источника при этом превышает суммарную мощность излучения отдельных его элементов.

Радиоизлучение потоков энергичных частиц. Ярким проявлением когерентного плазменного механизма радиоизлучения Солнца являются быстродрейфующие (10–30 МГц/с) всплески III типа (с яркостной температурой до 10^{11} К). Спустя более чем 30 лет выяснилось, что идея П. Уайлда (1950 г.) о природе всплесков III типа в основном верна: потоки субрелятивистских (10–100 кэВ) электронов, ускоренных в нижних слоях короны, распространяются через корональную плазму и вызывают радиоизлучение на локальной плазменной частоте электронов и ее второй гармонике. Гинзбург и Железняков [3] показали, что радиоизлучение вблизи электронной плазменной частоты возникает при рассеянии возбуждаемых пучком

электронов когерентных плазменных волн на частицах короны (рэлеевское рассеяние). Вторая гармоника всплесков есть результат слияния двух плазменных волн (комбинационное рассеяние). Эта работа стимулировала, кроме того, широкое изучение нелинейного взаимодействия волн в плазме.

Хотя теория [3] качественно объясняла основные особенности всплесков, оставались тем не менее и нерешенные проблемы. Старрок (1964 г.) заметил, что генерация плазменных волн сопровождается квазилинейной релаксацией пучка электронов, который тормозится на расстоянии порядка километра от места инъекции. Поэтому трудно объяснить движение пучка с почти постоянной скоростью ($\sim c/3$) вплоть до орбиты Земли и на большие расстояния.

Решение указанной проблемы заключалось в отыскании эффективного механизма стабилизации пучковой неустойчивости. Вопрос о стабилизации впервые был поставлен С.А. Капланом и В.Н. Цытовичем [150], которые предположили, что пучки электронов в солнечной короне стабилизируются из-за индуцированного рассеяния плазменных волн в нерезонансную с пучком область. Эффективно стабилизировать пучки может, по мнению С.А. Каплана, С.Б. Пикельнера и В.Н. Цытовича [151], и модуляционная неустойчивость плазменных волн.

Здесь нужно особо отметить вклад в теорию всплесков солнечного радиоизлучения, который внесли два крупных советских астрофизика, Каплан и Пикельнер, преждевременно ушедшие из жизни, и сотрудничавший с ними известный физик-теоретик Цытович. Разрабатываемый и популяризируемый ими подход, основанный на применении теории плазменной турбулентности для решения астрофизических задач, изложен в монографиях [151, 152] и получил в настоящее время широкое распространение. Прекрасным популярным пособием по радиоастрономии служит также книга Каплана "Элементарная радиоастрономия" [153].

Дальнейшие исследования условий стабилизации позволили В.В. Железнякову и В.В. Зайцеву [154, 155] сделать вывод, что стабилизация пучков в короне за счет индуцированного рассеяния и модуляционной неустойчивости имеет место лишь для достаточно быстрых ($\sim 0,5 c$) электронов и лишь на начальном участке траектории. Распространение электронных пучков в короне и межпланетной среде определяется квазилинейной релаксацией. В настоящее время теория всплесков III типа в основном завершена. Главные ее моменты заключаются в следующем [154–157].

Вблизи области инъекции электронов происходит интенсивная квазилинейная релаксация пучка. Затем генерация плазменных волн возобновляется на неоднородном переднем фронте пучка за счет непрерывного убегания вперед более быстрых частиц.

Несмотря на сильную квазилинейную релаксацию пучка, возможна длительная генерация плазменных волн на большом расстоянии благодаря эффекту перепоглощения плазменных волн пучком: энергия возбуждаемых на переднем фронте плазменных волн поглощается более медленными частицами заднего фронта. Поэтому пакет волн перемещается в короне с почти постоянной скоростью ($\sim c/3$). Это является решением проблемы, связанной с длительной генерацией плазменных волн в короне сильно релаксирующими электронными пучками.

Дальнейшему развитию теории всплесков III типа, в частности интерпретации направленности и поляризации излучения первой гармоники, стратификации электронных пучков, выяснению роли диффузной и одномерной компонент потоков в излучении, посвящены работы [158–161].

Радиоизлучение ударных волн. Уже в ранних работах, посвященных наиболее мощной компоненте солнечного радиоизлучения – всплескам II типа, предполагалось, что наблюдаемый частотный дрейф ($\sim 0,1$ МГц/с) соответствует распространению в короне ударной волны, содержащей заметную долю энергии вспышки. Тем не менее теория радиоизлучения II типа развита значительно меньше, чем теория всплесков III типа. Основная трудность здесь заключается в определении структуры фронта ударной волны.

Первая модель всплесков II типа, в которой учитывалась структура фронта МГД-ударной волны, распространяющейся поперек магнитного поля, была предложена С.Б. Пикельнером и М.А. Гинцбургом [162]. Ламинарная структура таких ударных волн при числах Маха $M < 2$ состоит из последовательности солитонов сжатия. При определенных условиях во фронте волны возникает неустойчивость бунемановского типа, возбуждающая потенциальные колебания. Трансформация их в электромагнитные волны приводит к излучению на первой и второй гармониках плазменной частоты электронов.

В дальнейшем теория радиоизлучения перпендикулярной ударной волны развивалась В.В. Железняковым [139], В.В. Зайцевым [157, 163–165], А.В. Степановым [166], В.В. Фомичевым и И.М. Чертоком [167]. В работах [157, 163–167] исследованы вопросы генерации радиоизлучения, нагрева и ускорения электронов во фронте, объяснены поляризационные особенности всплесков II типа, частотное распределение гармоник. На основе развитой модели в работах [157, 164, 168] были оценены параметры ударных волн и параметры короны.

Оставалось неясным, сохраняется ли осцилляторная структура фронта при развитии плазменной турбулентности. Численное решение МГД-уравнений с феноменологическим учетом турбулентности, проведенное в работе [169], показало, что структура фронта в короне не разрушается. Физически это означает, что временной масштаб фронта меньше времени “соударений” частиц с плазмонами.

Очевидно, что в теории всплесков II типа нельзя ограничиваться моделью перпендикулярной ударной волны, поскольку наблюдения свидетельствуют и о наклонном движении ударных волн по отношению к магнитному полю [170]. Ламинарная структура продольных и слабонаклонных ударных волн имеет вид раскручивающейся спирали. Из-за дрейфа электронов относительно ионов во фронте возникает модифицированная бунемановская неустойчивость, приводящая к нагреву электронов. Часть нагретых электронов вторгается в “холодную” плазму перед фронтом ударной волны и возбуждает плазменную турбулентность. Электромагнитное излучение создается путем трансформации плазменных волн на регулярных неоднородностях фронта. Такова в общих чертах суть модели всплесков II типа, генерируемых продольной ударной волной [171–173].

Нужно отметить исследованные в работах [172, 173] эффекты резкого увеличения коэффициента конверсии плазменных волн в электромагнитные из-за накопления энергии плазменных волн перед фронтом ударной

волны, а также возможные причины, приводящие к частотному расщеплению гармоник всплесков II типа.

Радиоизлучение энергичных частиц в корональных магнитных ловушках. Буашо (1958 г.) высказал предположение, что длительное (минуты—часы) широкополосное радиоизлучение IV типа обусловлено синхротронным излучением релятивистских электронов, захваченных в корональную магнитную ловушку. С повышением разрешающей способности радиоспектрографов выяснилось, что первоначально казавшееся бесструктурным радиоизлучение IV типа обладает сильно развитой тонкой структурой (см., например, обзор [174]), разнообразные свойства которой невозможно объяснить в рамках синхротронного механизма радиоизлучения.

Если энергичные частицы инжектируются в магнитную ловушку, то спустя некоторое время в ней формируется распределение частиц по скоростям с "конусом потерь". В результате развивается конусная неустойчивость плазменных волн, которые затем трансформируются в электромагнитные и дают радиоизлучение IV типа. Плазменный механизм всплесков IV типа был предложен Степановым [175]. Вопросы формирования спектров энергичных электронов с учетом развивающихся в источниках всплесков IV типа неустойчивостей мелкомасштабных волн рассмотрены в [176, 177]. В 70-х годах в СибИЗМИР СО АН СССР в лаборатории радиоастрономии, руководимой Г.Я. Смольковым, сформировалась небольшая группа радиоастрономов-теоретиков. Эта группа, работающая в тесном контакте с учеными ИПФАН СССР, внесла заметный вклад в теорию радиоизлучения Солнца.

Доказательством существенной роли конусных неустойчивостей в излучении из корональных ловушек являются всплески в поглощении на фоне континуума IV типа. В работе [178] было показано, что всплеск в поглощении возникает при инжекции в ловушку новой группы частиц, заполняющих конус потерь и срывающих конусную неустойчивость.

Всплески в поглощении наблюдаются не только на фоне континуума, но и на фоне "зебра-структуры" радиоизлучения IV типа, имеющей вид квази-эквидистантных по частоте полос. В.В. Железняков и Е.Я. Злотник [179, 180] разработали модель генерации "зебра-структуры", согласно которой такая структура есть результат слияния плазменных волн верхней гибридной частоты и мод Бернштейна, возбуждаемых из-за наличия конуса потерь. Интервал между полосами "зебра-структуры" определяется гирочастотой электронов. Отсюда можно определить магнитное поле в источнике, которое порядка нескольких гаусс на корональных уровнях, где генерируется излучение на частоте 300 МГц. На основе гипотезы о существенной роли конусных неустойчивостей в радиоизлучении IV типа объясняются и другие "экзотические" формы тонкой структуры: "головастики", "волокна" и т.п. [179] (см. также монографию Железняка [180, 181] и обзор [174]).

Со сверхтепловыми электронами в корональных ловушках связано не только радиоизлучение IV типа, но и менее продолжительные всплески V типа. В работе [182] предложена модель всплеска V типа, согласно которой радиоизлучение возникает из-за генерации плазменных волн движущимися навстречу друг другу пучками электронов. В пользу плазменного механизма происхождения всплесков V типа свидетельствует, в частности, наличие у них гармонической структуры [174].

С излучением из корональных (магнитных) ловушек связана и весьма распространенная форма спорадического радиоизлучения Солнца на метровых волнах — шумовые бури I типа. Большой вклад в исследования шумовых бурь внесен радиоастрономами ИЗМИРАНа [174, 183, 184]. Шумовые бури часто сопровождаются короткоживущими всплесками I типа, иногда наблюдаемыми в виде "цепочек". Основные идеи о механизмах генерации цепочек всплесков I типа принадлежат советским ученым. В работе [185] высказано предположение, что источником генерации цепочек всплесков I типа является слабая (с числом Маха $M < 1,3$) ударная волна, а прерывистость излучения связана с неоднородностями солнечной короны с характерным масштабом более $3 \cdot 10^8$ см. В работе [186] предложена модель, согласно которой всплески I типа создаются потоками электронов, захваченными между сближающимися фронтами. Механизм всплесков I типа, связанный с образованием солитонов электромагнитных волн, рассматривался в [187]. В целом же проблему происхождения шумовых бурь и всплесков I типа нельзя считать окончательно решенной.

Перейдем теперь к результатам наблюдений всплесков радиоизлучения, выполненных в Советском Союзе.

Наблюдения всплесков. Одни из первых в СССР наблюдений всплесков радиоизлучения Солнца, их поляризации в сантиметровом диапазоне длин волн были выполнены в ГАО АН СССР в Пулково. Было установлено, в частности, что знак поляризации всплесков в большинстве случаев совпадает со знаком поляризации S-компоненты на данный день, что говорит о преобладании волн необыкновенного типа. Интересно отметить, что анализ изменений со временем поляризации и интенсивности в диапазоне 2–5 см, выполненный в 1962 г. [188] на основе теории тормозного механизма, привел к оценкам температуры ($2 \cdot 10^7$ К) и плотности (10^{11} см⁻³), очень близким к тем, которые следуют из современных рентгеновских наблюдений всплесков. Такие высокие значения температуры в короне в то время не совпадали с оценками астрофизиков по эффектам в видимой области спектра.

В 1960 г. на радиотелескопе РТ-22 ФИАН были впервые локализованы всплески на волне 8 мм. Сопоставление с хромосферными вспышками, имевшими место в области, ответственной за всплески, позволило также локализовать всплески на более длинных волнах и определить плотности потоков [189].

В 1958–1960 гг. А.Ф. Дравских [190] в Пулково проводил наблюдения наклона спектра во всплесках в диапазоне 3 см, в некоторых из них он обнаружил резкие изменения наклона спектра. На основе этих наблюдений были высказаны предположения о возможности присутствия линии возбужденного водорода $\lambda = 3,04$ см в спектрах некоторых всплесков.

В 1964–1975 гг. в СибИЗМИРе проводились наблюдения всплесков радиоизлучения на длине волны 3,2 см с помощью поляриметра (диаметр антенны 4 м). В обычном режиме наблюдений регистрировались два параметра Стокса (I и V). В отдельные интервалы времени, общая продолжительность которых составила более 12 мес, регистрировались все четыре параметра Стокса. На материалах многолетних наблюдений детально рассмотрена связь изменения знака и степени круговой поляризации всплесков с измене-

нием положения и яркости узлов вспышек в H_{α} относительно фотосферных магнитных полей. Основные результаты представлены в работах [191–195].

В частности, было показано, что смена знака круговой поляризации во время развития всплесков является следствием двух причин. В одних случаях смена знака круговой поляризации происходит в результате перемещения ядер вспышек в H_{α} (а значит, и области генерации всплесков) в район пятен противоположной полярности магнитного поля [192, 195]. В этих случаях смена знака поляризации не связана с изменением физических условий в области генерации и знак поляризации определяется знаком необыкновенной волны в излучении. В других случаях смена знака поляризации не сопровождается изменением пространственной структуры H_{α} -вспышки и вызвана изменением физических условий в активной области, в результате чего меняется тип преобладающей волны в излучении всплеска. Изменение физических условий происходит за время порядка 10–20 с [196].

Длительные наблюдения всех параметров Стокса позволили подтвердить наличие эллиптической поляризации в излучении некоторых всплесков. Особенности развития таких всплесков позволяют предполагать, что линейная поляризация возникает в области генерации всплеска на начальной стадии. Оценки, выполненные в работе [197], показали, что возникновение линейно поляризованного излучения возможно при наличии больших градиентов плотности.

В 1979 г. в СибИЗМИРе были начаты наблюдения на длине волны 5,2 см с помощью радиоинтерферометров (отдельные группы антенн Сибирского солнечного радиотелескопа) с угловым разрешением от 4' до 17". Анализ результатов наблюдений выявил ряд новых особенностей в развитии вспышечной активности. Н.Н. Кардополова, В.П. Нефедьев, Г.Я. Смольков [198] исследовали серию всплесков радиоизлучения на начальной стадии развития активной области. Было установлено, что область энерговыделений вспышек по мере выхода магнитных полей в корону перемещается вверх от поверхности Солнца (рис. 4.5).

На более длинных волнах значительные успехи в обнаружении и исследовании новых типов всплесков были достигнуты в ИЗМИРАНе [174, 183, 184, 199–201], где с 1960 г. начали вводиться в действие спектрографы, созданные А.К. Маркеевым, Г.П. Черновым, О.С. Королевым, А.М. Карачуном. С приходом в лабораторию в 1963 г. воспитанников Горьковского университета В.В. Фомичева и И.М. Чертока в ИЗМИРАНе значительно расширились работы по физическому анализу природы солнечных всплесков. В частности, в течение последних 10 лет основные усилия лаборатории были сконцентрированы на исследованиях радиоизлучения в метровом диапазоне длин волн с акцентом на их тонкую структуру в целях выяснения механизмов генерации всплесков и получения информации о физических параметрах плазмы солнечной короны [201, 202] (рис. 4.6).

В 1970 г. заведующим лабораторией радиоизлучения Солнца в ИЗМИРАНе стал опытный радиоастроном Б.М. Чихачев. Большим планам по постройке новых радиотелескопов, по восстановлению радиоастрономического полигона в Крыму, которые вынашивал Б.М. Чихачев, не суждено было осуществиться. Внезапная его кончина в 1971 г. прервала не только эти планы, но и осуществление предложенного им оригинального и высокочувствительного

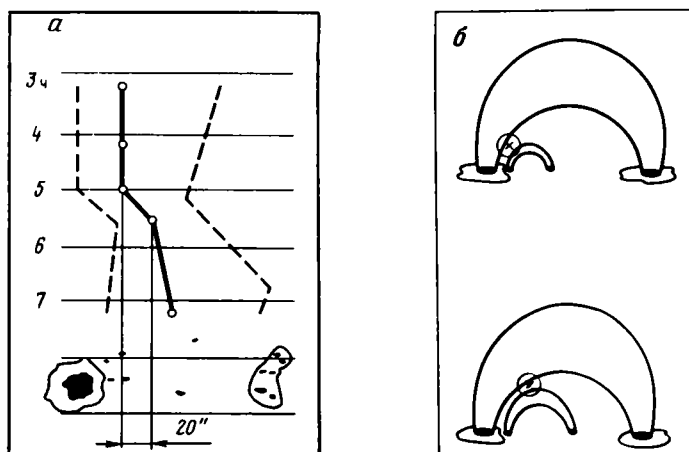


Рис. 4.5. Изменение положения и границ микроволнового излучения (а) и перемещение области энерговыведения вспышки в солнечной короне над группой пятен (б)

а: штриховые ломаные линии — границы областей радиоизлучения; сплошная ломаная — положение центра яркости

метода радиоастрономических исследований ионосферы. Много сделавший для создания и развития радиоастрономии в ИЗМИРАНе Э.И. Могилевский особое внимание уделяет кооперации радиоастрономических и оптических наблюдений Солнца и их связи с геофизическими явлениями.

С помощью спектрографа в диапазоне 2–3 м и отдельного радиотелескопа на длине волны 2,5 м в КРАО И.Г. Моисеевым в конце 50-х годов была исследована связь всплесков типа III с событиями в оптическом диапазоне (в линии H_{α}) и всплесков типа II с геоэффективными корпускулярными потоками [203, 204].

Для исследования Солнца в декаметровом диапазоне (на частотах 10–26 МГц) на протяжении последнего десятилетия успешно используется радиотелескоп УТР-2 РИАН УССР (г. Харьков), оснащенный комплектом радиометров, а также динамическими спектрографами с высоким частотным и временным разрешением. Радиотелескоп способен работать в режиме многочастотного радиогелиографа, что позволяет получать не только высококачественные динамические спектры солнечных радиовсплесков, но и определять положение соответствующих источников в короне. Большая эффективная площадь антенны УТР-2 (порядка 10^5 м^2) дает возможность исследовать даже очень слабые явления. В создании такого комплекса для отечественных радиоастрономических исследований Солнца в декаметровых волнах, обладающего широкими оперативными возможностями и способностью работать в различных режимах, а также в определении научной программы исследований большую роль сыграли В.А. Зиничев, В.О. Рапорт и Я.Г. Цыбко (НИРФИ), Э.П. Абринин, Л.Л. Базелян, А.В. Мень (ИРЭ АН УССР), В.В. Зайцев (ИПФАН СССР). Об эффективности работы комплекса свидетельствует обнаружение с его помощью нового явления бесстолкновительного торможения субрелятивистских электронных пучков в солнечной короне, обусловленного потерями энергии пучков на возбужде-

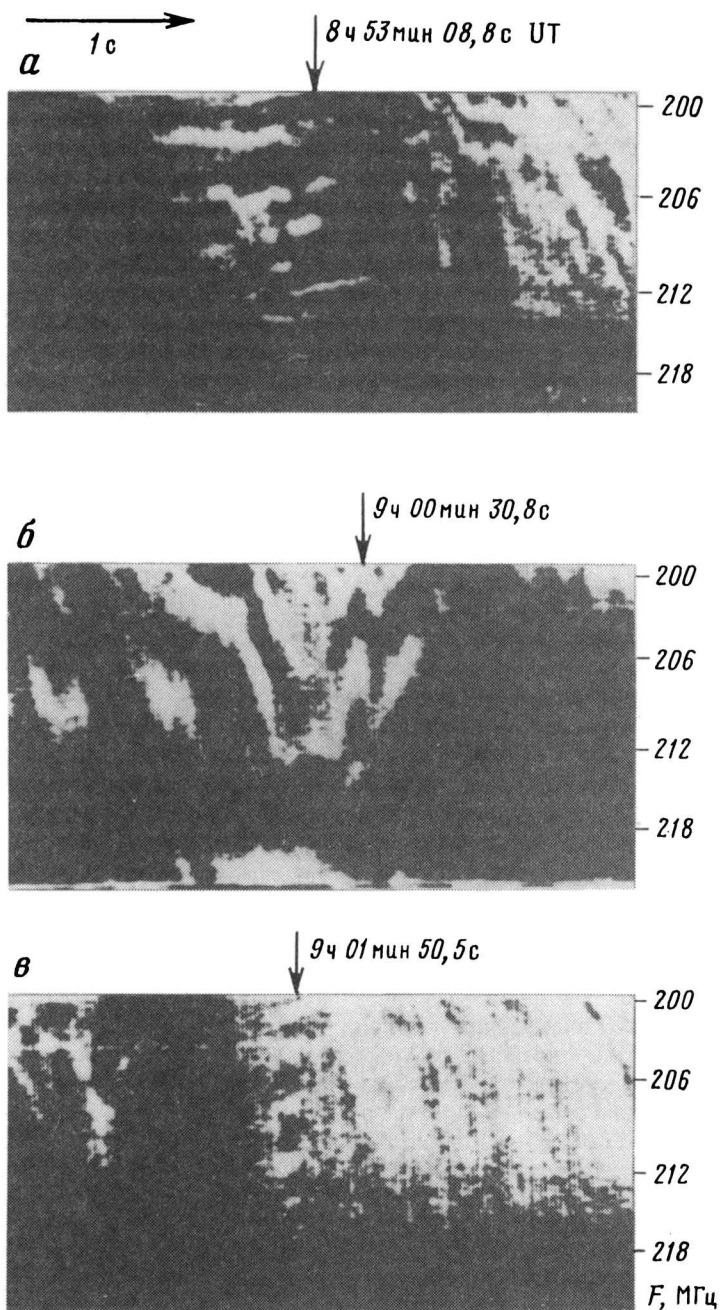


Рис. 4.6. Микроструктура солнечного радиоизлучения IV типа, зарегистрированная в ИЗМИРАНе 3.07.74 г.

Показаны различные формы "зебра"-структуры

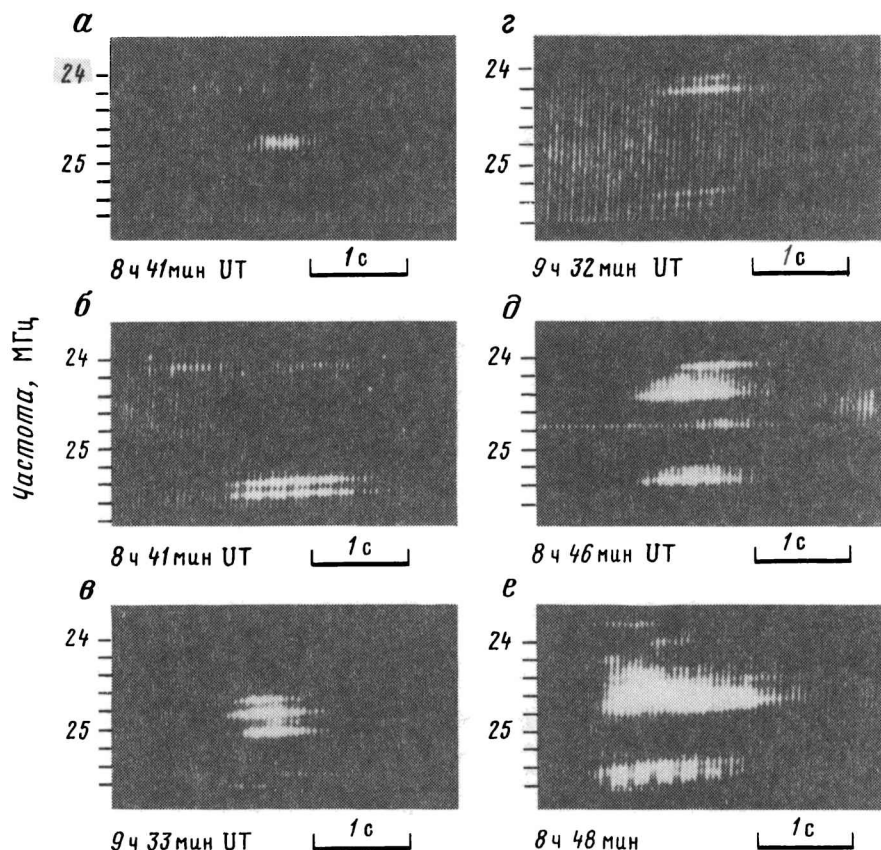


Рис. 4.7. Динамические спектры декаметрового радиоизлучения Солнца 3.07.73 г.

а — стрия-всплеск; *б* — расщепленная пара; *в* — триплет; *г–е* — всплески с двумя различными масштабами частотного расщепления

ние плазменных волн [205], первое наблюдение многократного радиоэха на II гармонике плазменной частоты [206], обнаружение новых свойств всплесков типа "дрейфующей пары" [207] и целого ряда разновидностей тонкой структуры декаметровых всплесков [208, 209] (рис. 4.7).

Наблюдения всплесков шли по двум путям: первый — наблюдения отдельных явлений на Солнце с помощью специально созданных инструментов (спектрографов, интерферометров, больших антенн и т.д.); второй — радиослужба Солнца, осуществляющая систематические наблюдения максимально возможного числа всплесков.

К 1960 г. в СССР почти прекратились регулярные наблюдения за Солнцем. Наблюдения велись только в отдельных пунктах на одной-двух волнах. Состояние аппаратуры и нестандартность методики измерений не позволяли получать достаточно точных данных о всплесках и потоках радиоизлучения. Отсутствие патрульных данных о радиоизлучении Солнца не позволяло проводить анализ результатов экспериментальных исследований Солнца

и воздействия солнечной активности на процессы в ближнем космосе и околоземном пространстве.

Необходимо было создать надежную патрульную службу измерений потоков радиоизлучения и всплесков в широком частотном диапазоне. С этой целью в 1963 г. в НИРФИ начала создаваться такая радиослужба Солнца и разрабатываться специальная аппаратура, радиотелескопы и стандартная методика наблюдений. Эти работы велись под руководством М.М. Кобрин группой сотрудников НИРФИ во главе с О.И. Юдиным. На станции НИРФИ Зименки к 1965–1967 гг. были созданы радиотелескопы службы Солнца на длины волн 3,2 и 10 см (на антеннах диаметром 1,2 м), 30, 45, 150 и 300 см (на антеннах диаметром 15 м). С 1971 г. во главе станции Зименки становится Т.С. Подстригач. В 1971–1975 гг. радиотелескопы службы Солнца были существенно усовершенствованы. Результаты патрульных наблюдений ежемесячно публикуются в виде бюллетеня "Радиоизлучение Солнца. Станция Знаменки, НИРФИ" и во всех советских и международных бюллетенях солнечных данных. Материалы наблюдений являются хорошей базой для исследования физики Солнца (и солнечной активности). Была исследована зависимость между яркостными кривыми (солнечных) вспышек и всплеском радиоизлучения Солнца сантиметрового диапазона [210], установлены временные связи между радиовсплесками и мягким рентгеновским излучением [211]. Одновременно НИРФИ как головной институт осуществлял координационную работу по унификации и стандартизации наблюдений в системе радиослужбы Солнца СССР. В радиослужбу Солнца в этот период включились Горная астрономическая станция (г. Kislovodsk), Горно-таежная станция (г. Уссурийск), Абастуманская астрофизическая обсерватория. В ИЗМИРАНе были начаты регулярные наблюдения на спектрографах.

По инициативе председателя совета "Солнце–Земля" Н.В. Пушкова в 1969 г. была организована служба Солнца в Гаване (Куба). Радиотелескоп на длину волны 4,5 см был изготовлен и установлен на Кубе сотрудниками отдела радиоастрономии ГАО [212]. Наблюдения всплесков потоков и поляризации радиоизлучения Солнца ведутся на нем практически непрерывно, обеспечивая для содружества социалистических стран службу Солнца в ночное для Европы и Азии время. Станция, входящая сейчас в состав Института астрономии и геофизики АН Кубы, значительно расширилась: с участием советских специалистов (ГАО, САО, КраО, НИРФИ) ведутся поляризационные наблюдения в диапазоне $\lambda = 2$ см, наблюдения наклона спектра и интенсивности в диапазоне 3 см, полного потока излучения на длину волны 1,5 м.

4.3. Диагностика плазмы солнечных вспышек и прогноз их геоэффективности

Тесная связь между солнечными вспышками и многими явлениями на Земле обусловила повышенный интерес к использованию наблюдений спорадического солнечного радиоизлучения для решения проблемы солнечно-земных связей. В этом отношении большую ценность представляют модели радиоизлучения активных областей, содержащих токовые слои, в которых происходит аннигиляция магнитного поля, являющаяся, соглас-

но современным представлениям [213], источником энергии солнечной вспышки. В работах [214, 215] были теоретически исследованы характеристики теплового циклотронного излучения активных областей с токовыми слоями для различных моделей источника.

Большой вклад в создание моделей вспышки внес С.И. Сыроватский, изучивший особенности возникновения и развития токовых слоев в атмосфере Солнца, исследовавший вместе с В.М. Кузнецовым экранирующие и отражающие свойства токовых слоев в микроволновом излучении и предложивший в 1977 г. на этой основе некоторые методы прогноза солнечных вспышек [216–218].

Возможности диагностики плазмы вспышек на импульсной фазе по данным микроволнового и жесткого рентгеновского излучения вспышек исследованы также в работах [144, 145, 219–221]. Предложенный подход позволяет оценивать не только основные параметры плазмы вспышечных петель — области первоначального энерговыделения: плотность ($n_0 \approx 10^{11} \div 10^{12} \text{ см}^{-3}$), температуру ($T_0 \approx 10^7 \div 10^8 \text{ К}$), магнитное поле ($B_0 \approx 10^2 \div 10^3 \text{ Гс}$), но также "пробочное" отношение вспышечных петель ($\sigma \lesssim 10$), уровень ленгмюровской турбулентности ($W/n_0 k T_0 \approx 10^{-4} \div 10^{-5}$) и важный для прогноза геоэффективности вспышки параметр β , равный отношению давления плазмы и энергичных частиц к давлению магнитного поля. При $\beta \gtrsim 0,3$ возможен выход энергичных частиц из вспышечных петель.

Различными аспектами проблемы прогнозирования вспышек и их последствий по электромагнитному излучению в нашей стране успешно занимались в КРАО, ИЗМИРАН, ИПФАН СССР, НИРФИ, СибИЗМИР, ИПГ, НИИФ ЛГУ, ГАО, САО, ИМБП. Наиболее завершенными оказались исследования, позволившие предложить методики определения параметров энергичных протонов в околоземном космическом пространстве. К ним относится методика ИЗМИРАН, использующая в качестве входных параметров данные о радиоизлучении вспышек в широком диапазоне, включая метровые волны [222–225]. В работе [226] было показано, что учет всплесков метрового радиоизлучения является важным для определения условий выхода протонов в межпланетном пространстве.

Сотрудниками ИПФАН, ИЗМИРАН, ИПГ и СибИЗМИР предложена модель, объясняющая связь пульсаций радиоизлучения IV типа с параметрами потоков энергичных протонов в межпланетном пространстве. При этом на основе анализа большого числа событий установлена корреляция (86%) секундных пульсаций всплесков IV типа с протонными явлениями и показано, что наиболее короткие цуги пульсаций сопровождаются выходом большого числа протонов с жестким спектром [227]. Пульсации возникают при инжекции в корональную магнитную арку энергичных ($\gtrsim 30 \text{ МэВ}$) протонов, возбуждающих МГД-колебания арки на черенковском или баунс-резонансе [228]. Эти колебания приводят к модуляции радиоизлучения IV типа. По глубине модуляции пульсаций оценивается амплитуда МГД-колебаний и, следовательно, энергия ускоренных во вспышке протонов [229].

Для облегчения практического осуществления диагностики средствами существующей сети станций службы Солнца разработана также методика, использующая наблюдения только в сантиметровом диапазоне волн, до-

пускающая использование ЭВМ в реальном времени [230–232]. Ряд работ содержит результаты, использование которых полезно для усовершенствования обеих упомянутых методик [233]. Весьма информативными оказались результаты ряда статистических исследований радиовсплесков, позволяющие получить сведения, порой недоступные даже наблюдениям с высоким разрешением [234]. Таким образом, были выяснены существенные для построения модели радиовсплесков зависимости между их временными, спектральными и поляризационными особенностями [233, 235, 236].

Важной задачей предстоящего десятилетия является создание надежных методов диагностики и прогноза геоэффективных солнечных вспышек по их радиоизлучению. С точки зрения долгосрочного прогнозирования чрезвычайно ценны наблюдения на больших радиотелескопах (ТНА-1500, РАТАН-600, ССРТ), позволяющие проследить динамику активных областей с высоким пространственным и временным разрешением. Краткосрочное прогнозирование (с заблаговременностью 1–3 сут) основано на оценке вероятности появления крупных вспышек в конкретных активных областях и связано с исследованием предвспышечных эволюционных изменений и предвестников. Наиболее перспективными здесь представляются дальнейшие исследования (экспериментальные и теоретические) квазипериодических составляющих в излучении активных областей и изменений в поляризационной структуре этих областей. И те и другие тесно связаны с эволюцией активной области к состоянию вспышки.

Для улучшения оперативного прогноза геоэффективных солнечных вспышек на основе диагностики вспышечной плазмы необходимо дальнейшее исследование процессов, влияющих на формирование спектров ускоренных частиц в области вспышки и на их связь с параметрами радиоизлучения вспышки. Особую важность в связи с этим приобретает создание адекватного механизма микроволнового радиоизлучения вспышек на импульсной фазе. С экспериментальной точки зрения крайне необходимо создание диагностико-прогностических комплексов, способных, кроме наблюдений с высоким временным разрешением (10^{-2} – 10^{-3} с), регистрировать спектры радиоизлучения вспышек в диапазоне 1–20 ГГц. Спектры микроволнового радиоизлучения несут большую информацию о магнитных полях и других параметрах плазмы во вспышках, а также о спектрах солнечных космических лучей и условиях их выхода из короны Солнца.

ОТКРЫТИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ СВЕРХКОРОНЫ СОЛНЦА
И МЕЖПЛАНЕТНОЙ ПЛАЗМЫ

5.1. История развития исследований

Открытие и исследование сверхкороны Солнца. Открытие сверхкороны Солнца — одно из крупнейших достижений советской радиоастрономии. Историю этого открытия следует начинать с 1951 г. В этом году В.В. Виткевичем был предложен новый метод исследования внешних слоев солнечной короны — метод просвечивания [1]. Сущность метода состояла в анализе влияния, которое оказывает среда солнечной короны на радиоволны от источника, находящегося за Солнцем, и определения по этому влиянию параметров просвечиваемой среды.

В качестве источника радиоволн было предложено использовать Крабовидную туманность, которая ежегодно сближается на небесной сфере с Солнцем до 4,5 радиусов Солнца. Поскольку при близком расположении источника просвечивания от Солнца возникает проблема подавления влияния такого мощного радиоисточника как Солнце, Виткевич предложил использовать интерферометрический метод с таким размером лепестков диаграммы направленности, чтобы интерферометр реагировал только на радиоисточник просвечивания, имеющий угловые размеры, значительно меньшие углового размера Солнца.

В упомянутой выше работе Виткевичем были предложены также возможные варианты влияния коронального вещества на проходящие радиоволны: рефракция, поглощение и рассеяние на неоднородностях электронной концентрации. Таким образом, были высказаны все основные идеи, реализация которых привела к открытию сверхкороны Солнца, поэтому есть все основания считать работу [1] приоритетной.

Первые наблюдения были проведены Виткевичем на Крымской станции ФИАН в 1951 г. с помощью морского интерферометра, но они были неудачными из-за того, что на Солнце в это время был мощный локальный источник, который давал сильный вклад в интерференционную картину. В июне 1952 г. наблюдения были повторены на двухэлементном интерферометре с базой $D = 670$ м. Были получены данные об уменьшении амплитуды интерференционной картины при сближении на небесной сфере Крабовидной туманности с Солнцем. Однако эти результаты не были уверенными в связи с тем, что во время наблюдений шли проливные дожди.

Уверенные результаты дала серия наблюдений 1953 г. [2]. В этой серии было получено, что при сближении источника с Солнцем происходит уменьшение амплитуды интерференционной картины, начиная с угловых расстояний между источником и Солнцем 12–15 радиусов Солнца. На рис. 5.1 показано изменение амплитуды интерференционной картины со временем — кривая “радиозатмения”. Эффект изменения амплитуды интерференционной картины со временем был интерпретирован Виткевичем как увеличение видимого размера Крабовидной туманности за счет рассеяния радиоволн на неоднородностях электронной концентрации. Вместе с тем оставалась возможность объяснения наблюдаемого эффекта поглощением

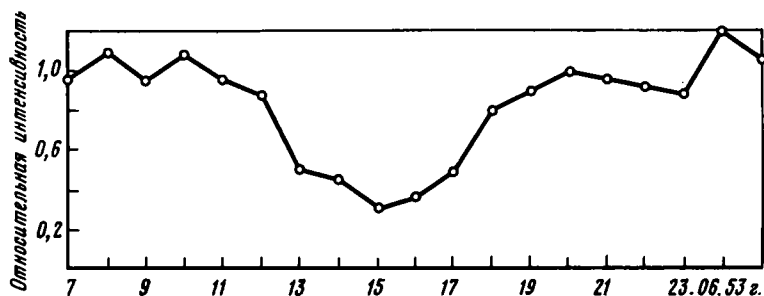


Рис. 5.1. Изменение амплитуды интерференционной картины при сближении Крабовидной туманности с Солнцем [2]

излучения корональным веществом. Наблюдения 1954 г., проведенные Виткевичем на двух интерференционных базах, показали, что мы имеем дело с эффектом рассеяния радиоволн на неоднородностях электронной концентрации. В наблюдениях 1952–1954 гг. активную помощь Виткевичу оказал В.А. Удальцов.

В публикации 1956 г. впервые появился термин "сверхкорона", которым Виткевич назвал самые внешние слои солнечной короны (от единиц до нескольких десятков солнечных радиусов), наблюдаемые с помощью метода просвечивания [3].

Дальнейшие систематические наблюдения эффекта рассеяния проводились на Крымской станции ФИАН до 1962 г. С 1957 г. по 1963 г. наблюдения проводились на Окской станции ФИАН (ныне Радиоастрономическая станция ФИАН). В результате этих наблюдений было установлено изменение электронной концентрации с циклом солнечной активности и тем самым доказано солнечное происхождение вещества сверхкороны (В.В. Виткевич, 1957). С помощью наблюдений на радиоинтерферометрах с различной ориентацией баз обнаружена анизотропия углового рассеяния радиоволн — эллипс рассеяния вытянут преимущественно в направлении, перпендикулярном радиальному направлению, что говорило о вытянутости неоднородностей электронной концентрации преимущественно в радиальном направлении (В.В. Виткевич, Б.Н. Пановкин, 1957 г. [4]). На основании этих наблюдений был сделан вывод о том, что магнитное поле в сверхкороне имеет преимущественно радиальный характер, который обусловлен вытягиванием силовых линий движущейся от Солнца плазмой (В.В. Виткевич, 1960 г. [5]). В наблюдениях 1959–1962 гг. принимали участие сотрудники Крымской станции В.И. Бабий, М.Н. Горелова, А.Г. Суховой. В наблюдениях на Окской станции — Б.Н. Пановкин и В.И. Власов.

В 1965–1966 гг. интерферометрические наблюдения эффекта рассеяния радиоволн в сверхкороне были проведены в РИАН УССР (Харьков) в дециметровом диапазоне волн (С.Я. Брауде, Л.Л. Базелян, А.В. Мень). Был обнаружен эффект падения потока радиоизлучения Крабовидной туманности на самых низких частотах (20 и 25 МГц) в фазе максимального сближения источника с Солнцем. Этот эффект объяснен совместным влиянием рефракции и рассеяния излучения при наличии статистической

неоднородности среды (характерный угол рассеяния сравним с угловым расстоянием источника до Солнца) [6].

Исследования межпланетной плазмы. В 1964 г. А. Хьюш, П.Ф. Скотт и Д. Уилс (Англия) обнаружили мерцания радиоисточников на неоднородностях межпланетной плазмы — с этого времени начался новый этап в исследовании сверхкороны Солнца и межпланетной плазмы: появилась возможность изучать межпланетную плазму от единиц до нескольких сотен радиусов Солнца (район орбиты Земли). Следует отметить, что первая попытка обнаружить мерцания локальных источников на Солнце, обусловленные корональными неоднородностями, была предпринята В.В. Писаревой (НИРФИ) в 1959 г. Результаты наблюдений были отрицательными.

В СССР первые наблюдения мерцаний были начаты в феврале 1965 г. на радиотелескопе ДКР-1000 Радиоастрономической станции ФИАН. Они велись под руководством В.В. Виткевича сотрудниками станции В.И. Власовым и Т.Д. Антоновой (Шишовой) [7]. В том же 1965 г. по инициативе и под руководством Виткевича были развернуты работы по созданию двух сравнительно небольших радиотелескопов (с эффективной площадью порядка 1000 м^2) в Калининской и Ярославской областях. По одновременным наблюдениям мерцаний на трех радиотелескопах, проведенных Виткевичем и Власовым в 1966 г., была определена скорость движения дифракционной картины и соответственно скорость солнечного ветра, причем впервые в мире была определена скорость солнечного ветра на близких к Солнцу расстояниях и на высоких гелиоширотах [8]. Эти же наблюдения позволили определить пространственный масштаб неоднородностей межпланетной плазмы, ответственных за мерцания (около 200 км). Наблюдения велись регулярно в течение 1966–1970 гг. В результате наблюдений были определены скорость движения, размеры, форма и ориентация неоднородностей, выявлена зависимость характеристик неоднородностей от гелиоцентрической широты и индекса солнечной активности [9].

В 1968 г. Виткевичу за открытие и исследование сверхкороны Солнца и межпланетной плазмы была присуждена Государственная премия СССР. Обнаружение сверхкороны Виткевичем и обнаружение радиальных магнитных полей в сверхкороне Виткевичем и Б.Н. Пановкиным отмечены дипломами за открытие. После безвременной кончины В.В. Виткевича в 1972 г. исследования межпланетной плазмы были продолжены его учениками: В.И. Власовым, Н.А. Лотовой, Т.Д. Шишовой, В.И. Шишовым.

Новый этап в исследовании межпланетной плазмы начался в 1975 г. после вступления в строй на Радиоастрономической станции ФИАН Большой сканируемой антенны — БСА. Большая эффективная площадь антенны — около $20\,000 \text{ м}^2$, высокая помехозащищенность и возможность быстрого маневрирования диаграммой направленности позволяли в течение суток наблюдать несколько сот радиоисточников. Это, в свою очередь, позволило проводить построение карт распределения индексов мерцаний радиоисточников по небу и соответственно получать карты распределения турбулентной межпланетной плазмы и на основе этой информации изучать структуру и динамику крупномасштабных образований в межпланетной плазме. Первая серия наблюдений была проведена в апреле 1975 г. Власовым, Шишовым, Шишовой [10], в дальнейшем систематические наблюдения (ежедневно наблюдалось около 150 мерцающих источников) про-

водились Власовым. В результате этих исследований установлено, что имеется сильная корреляция между средним по всему небу индексом мерцаний радиоисточников и A_p -индексом геомагнитной активности, причем вариации индексов мерцаний опережают вариации A_p -индексов. Это открывает возможность прогнозирования геомагнитной активности по радиоастрономическим наблюдениям межпланетной плазмы. Установлено также, что с циклом солнечной активности изменяются в основном полярные области межпланетной плазмы [11–13].

В 1973 г. Т.Д. Шишовой с участием В.И. Шишова и А.В. Пынзря была начата программа исследования временных спектров мерцаний радиоисточников [14]. В результате этих исследований было установлено, что спектр турбулентности межпланетной плазмы в районе орбиты Земли имеет степенной вид в пределах масштабов от 30 до 3000 км (показатель степени трехмерного спектра $n \approx 3,6$ [11].

Важную роль в установлении общего вида спектра турбулентности межпланетной и околосолнечной плазмы сыграли исследования, проводимые в ИРЭ АН СССР под руководством М.А. Колосова и О.И. Яковлева. Исследования основаны на просвечивании межпланетной плазмы искусственным когерентным источником, помещенным на космическом аппарате. Идея использовать монохроматическое излучение для просвечивания межпланетной плазмы была предложена в 1965 г. М.А. Колосовым, О.И. Яковлевым и А.М. Ефимовым [15]. Первые измерения этим методом были проведены в 1972 г. с помощью космического аппарата "Марс-2" [16].

Н.А. Савичем применительно к задачам изучения космической плазмы был развит метод дисперсного интерферометра, который основан на измерении приведенной разности двух фаз излучаемых с космического аппарата сигналов, когерентных между собой [17]. Этот метод был использован вначале для изучения межпланетной плазмы, а затем для исследования неоднородной структуры околосолнечной плазмы [18, 19].

В результате трех серий наблюдений, выполненных при полете аппаратов "Марс-2", "Марс-7" и "Венера-10", получены весьма ценные данные о спектре турбулентности в околосолнечной плазме в широком интервале масштабов: установлен степенной характер спектра турбулентности, обнаружен внутренний масштаб турбулентности, изучена зависимость характеристик спектра от расстояния до Солнца, в частности, обнаружена особенность в поведении неоднородностей в переходной зоне от дозвукового истечения к сверхзвуковому, а также определена скорость дрейфа неоднородностей в области ускорения солнечного ветра [20].

Параметры солнечного ветра в ближайшей окрестности Солнца были определены также по наблюдениям мерцаний квазаров в сантиметровом диапазоне волн на радиотелескопе РАТАН-600. Наблюдения были начаты в 1976 г. по инициативе Ю.Н. Парийского, Т.Д. Шишовой и В.Г. Мингалиевым [21]. С 1979 г. ближайшая окрестность Солнца исследовалась с помощью наблюдений на радиотелескопе РТ-22 (ФИАН) мерцаний мазерных источников в линии водяного пара (Д.Ф. Блумс, Н.А. Лотова, Р.Л. Сороченко) [22].

Анализ межпланетных мерцаний радиоисточников позволяет также оценивать угловые размеры источников в диапазоне размеров от долей до единиц угловых секунд. Идея такого использования мерцаний была

высказана Виткевичем. Оценки угловых размеров и потоков мерцающих источников проводились Т.Д. Антоновой, А.В. Пынзарем, В.С. Артюхом (ФИАН), В.Г. Панаджаном (БАО) на метровых волнах. По инициативе С.Я. Брауде и В.С. Артюха такие измерения начаты также в ИРЭ АН УССР (И.Н. Жук, Б.П. Рябов, В.П. Бовкун) на дециметровых волнах.

Развитие теории. Правильное понимание материалов наблюдений обеспечивалось развитием теории распространения радиоволн в космической турбулентной плазме.

Определенный вклад в теорию рассеяния радиоволн на неоднородностях сверхкороны Солнца был сделан Виткевичем при интерпретации полученных им наблюдательных данных в 1955–1962 гг. В 1955–1968 гг. вопросами теории рассеяния радиоволн на неоднородностях сверхкороны Солнца (в том числе с учетом анизотропии неоднородностей) занималась Лотова [23].

В 1969 г. П.В. Блюх, В.Г. Сеницын и И.М. Фукс исследовали поведение рассеяния излучения с учетом эффекта рефракции и статистической неоднородности среды; результаты исследования были применены к интерпретации наблюдений рассеяния излучения в дециметровом диапазоне [24].

Возможность наблюдения мерцаний радиоисточников на неоднородностях околосолнечной плазмы теоретически впервые рассматривалась В.Л. Гинзбургом и В.В. Писаревской в 1955 г. [25]. К моменту обнаружения мерцаний в 1964 г. уже имела развитая теория слабых мерцаний, ведущая роль в развитии которой принадлежала советским ученым С.М. Рытову, В.И. Татарскому, Л.А. Чернову.

Вместе с тем слабо был изучен режим сильных мерцаний. Первая теоретическая работа, посвященная этому режиму, сделана Писаревой в 1958 г.; в ней численно определены сильные флуктуации амплитуды монохроматической волны, прошедшей через случайно-неоднородный фазовый экран. Получено, что относительные флуктуации интенсивности насыщаются на уровне, близком к единице [26].

Аналитическая теория сильных мерцаний была развита В.И. Шишовым: выведены (1967, 1968 г.) и исследованы решения (1970–1974 гг.) уравнения для четвертого момента поля волны, определяющие флуктуации интенсивности волн, распространяющихся в случайно-неоднородной среде (часть результатов была получена совместно с К.С. Гочелашвили) [27, 28].

Частотная структура флуктуаций поля, т.е. поведение флуктуаций поля с изменением несущей частоты волны, изучалась в работах Л.М. Ерухинова начиная с 1967 г. [29].

Следует отметить, что теория сильных мерцаний применительно к другим областям физики развивалась в работах В.И. Татарского, Л.А. Чернова и других. В целом советские исследования заметно опережали аналогичные исследования за рубежом.

В период 1972–1980 гг. Н.А. Лотовой и И.В. Чашеем разрабатывалась теория мерцаний радиоисточников на нестационарных неоднородностях межпланетной плазмы. Было показано, что по фазовому спектру мерцаний, который получается из кросс-корреляционной функции мерцаний радиоисточника, регистрируемого одновременно на двух пунктах, можно получить информацию о функции распределения скоростей неоднородно-

стей межпланетной плазмы на луче зрения. Проведенный Лотовой, Чашеим и Блумсом анализ наблюдательных данных, полученных американскими исследователями, выявил наличие значительной дисперсии скоростей в межпланетной плазме (порядка 30% от среднего значения) [30, 31].

Определенные успехи достигнуты в понимании природы неоднородностей межпланетной плазмы. В 1968 г. Н.А. Лотовой и А.А. Рухадзе впервые были привлечены механизмы плазменной неустойчивости, связывающие природу межпланетных неоднородностей с волновыми процессами в среде [32]. С 1977 г. Чашей и Шишов разрабатывают модель турбулентности межпланетной плазмы, элементами которой являются альвеновские и магнитозвуковые волны [33].

В заключение отметим активную работу М.В. Конюкова в 1965–1970 гг. по разработке теории формирования солнечного ветра, в частности по учету влияния теплопроводности и вязкости на процесс ускорения вещества.

5.2. Современные представления о сверхкороне Солнца и межпланетной плазме: в результате исследований

Метод измерения. Околосолнечное и межпланетное пространство заполнено высокотемпературной, полностью ионизованной плазмой. Бесспорным лидером в локальных измерениях параметров межпланетной плазмы является метод прямого зондирования с помощью датчиков, расположенных на космических аппаратах. Радиоастрономические методы позволяют получать более ограниченную информацию в основном об электронной концентрации N_e и скорости v плазмы. Но радиоастрономические методы позволяют получать общую, интегральную структуру распределения N_e и v в межпланетном пространстве, кроме того, дают информацию о плазме на высоких гелиоширотах и в близких к Солнцу областях — эти возможности пока недоступны датчикам на космических аппаратах.

Радиоастрономические методы измерений основаны на эффектах модуляции фазы и амплитуды радиоволны при прохождении последней через среду с флуктуациями показателя преломления. Эти эффекты в соответствии со способом измерений можно подразделить на следующие:

1. Эффекты рассеяния:

а) увеличение видимого углового размера источника (измерения этого эффекта были исторически первыми; они проводились с помощью интерферометров);

б) уширение узкого импульса излучения (измерения реализованы с помощью наблюдения пульсаров);

в) уширение спектральной линии (измерения реализованы с помощью передатчиков на космических аппаратах).

2. Эффект мерцаний (амплитудная модуляция радиоволн), полностью подобный известному эффекту мерцаний звезд (на межпланетных неоднородностях мерцают источники с угловыми размерами менее $1''$ — в основном квазары).

3. Эффект фазовых флуктуаций (фазовые сцинтилляции), требующий когерентных источников излучения (его измерения реализованы с помощью передатчиков на космических аппаратах).

В настоящее время имеется достаточно хорошая теория распространения волн в случайно-неоднородных средах, которая позволяет по характеристикам модулированного излучения восстановить характеристики неоднородностей межпланетной плазмы [11, 28, 31].

Основой теории является волновое уравнение, записанное для среды со случайно-неоднородными флуктуациями показателя преломления. Вариации показателя преломления Δn связаны с электронной концентрацией N_e соотношением [34]

$$\Delta n = A_1 (f_0/f)^2 N_e, \quad (5.1)$$

где $A_1 = e^2/2\pi m f_0^2 = 4 \cdot 10^{-9} \text{ см}^3$; $f_0 = 100 \text{ МГц}$; f — несущая частота радиоволны; e, m — заряд и масса электрона.

Электронная концентрация N_e как функция координаты r содержит два типа зависимостей: плавную, масштаб которой сравним с расстоянием от точки измерения до Солнца R , и флуктуации, масштабы которых много меньше R . Мелкомасштабные флуктуации задают статистически. Наиболее информативной статистической характеристикой среды является квадратичный спектр пространственных гармоник

$$\phi_{N_e}(\mathbf{q}) = \langle [(1/2\pi)^3 \int d^3 r \exp[-i(\mathbf{q}\mathbf{r})] N_e(\mathbf{r})]^2 \rangle;$$

здесь угловые скобки обозначают усреднение по ансамблю; $\mathbf{q}$ — пространственная частота.

В межпланетной плазме спектр ϕ_{N_e} близок к изотропному, зависит в основном от $q = |\mathbf{q}|$, и в широких пределах изменения q является степенным. Реальный спектр достаточно хорошо представляет следующая модель [28, 35]:

$$\phi_{N_e}(q) = C_{N_e}^2 [(1/L)^2 + q^2]^{-n/2} \exp[-(ql)^2], \quad (5.2)$$

где L и l — внешний и внутренний масштабы турбулентности. Коэффициент $C_{N_e}^2$ может быть выражен через средний квадрат флуктуаций электронной концентрации $\langle (\Delta N_e)^2 \rangle$:

$$C_{N_e}^2 = B_1 \langle (\Delta N_e)^2 \rangle L^{3-n},$$

$$B_1 \simeq \begin{cases} \frac{(n-3)\Gamma(n/2)}{2\pi\sqrt{\pi}\Gamma((n-1)/2)}, & n > 3, \\ 2\pi \ln(L/l), & n = 3. \end{cases}$$

Соотношение, определяющее B_1 , получено при $L \gg l$; $\Gamma(x)$ — гамма-функция.

Развитие возмущений поля волны в случайно преломляющей среде начинается с развития фазовых возмущений, затем вступают в действие эффекты фокусировки и интерференции, которые приводят к появлению флуктуаций амплитуды. Движение среды относительно луча зрения преобразует пространственные флуктуации во временные. Мы приведем без вывода ряд соотношений, которые связывают наблюдаемые характе-

ристики флуктуаций параметров волны со спектром φ_{N_e} и скоростью движения среды v .

Крупномасштабные флуктуации фазы можно описать в линейном геометрикооптическом приближении [28]. В этом приближении квадратичный временной спектр флуктуаций фазы связан с φ_{N_e} простым соотношением

$$\varphi_s(\omega) = A_2 \left(\frac{f_0}{f} \right)^2 \int_0^{z_0} \frac{dz}{v_1} \int dq_y \varphi_{N_e}(q_x, q_y, q_z = 0) \Big|_{q_x = \frac{2\pi\omega}{v_1}}. \quad (5.3)$$

$$A_2 = (2\pi)^4 f_0^2 A_1^2 / c^2 \approx 2,8 \cdot 10^{-19} \text{ см}^4;$$

здесь временная частота ω выражена в герцах; c — скорость света; v_1 — компонента скорости, нормальная лучу зрения; z_0 — расстояние от наблюдателя до источника. По наблюдаемому фазовому спектру φ_s мы можем восстановить спектр φ_{N_e} . Если для φ_{N_e} принять вид (5.2), то при $\omega < v_1/l$ имеем

$$\varphi_s(\omega) = A_2 B_2 (f_0/f)^2 \int_0^{z_0} \frac{dz}{v_1} \frac{C_{N_e}^2}{[(1/L)^2 + (2\pi\omega/v_1)^2]^{(n-1)/2}},$$

$$B_2 = \sqrt{\pi} \Gamma\left(\frac{n}{2} - 1\right) / \Gamma\left(\frac{n}{2}\right).$$

Степенному виду спектра φ_{N_e} с показателем степени n соответствует степенной вид спектра φ_s с показателем степени $n - 1$.

Величины $C_{N_e}^2$, L , и v_1 являются плавными функциями координат. Наиболее сильной является зависимость $C_{N_e}^2$ от R , причем $C_{N_e}^2$ убывает с ростом R . Положение луча зрения относительно Солнца можно охарактеризовать прицельным расстоянием луча зрения относительно центра Солнца p или элонгацией ϵ — угловым расстоянием между радиоисточником и центром Солнца:

$$p = R_0 \sin \epsilon, \quad R_0 = 1 \text{ a.e.}$$

Переменное расстояние R в интеграле (5.3) можно выразить через ϵ и z :

$$R^2 = R_0^2 \sin^2 \epsilon + (R_0 \cos \epsilon - z)^2.$$

Фазовые флуктуации растут с уменьшением частоты радиоволны f и элонгации ϵ .

Часто измеряют также флуктуации частоты радиоволны f . Вариации f можно определить как производную от фазы по времени

$$\Delta f = ds/dt.$$

Соответственно квадратичный временной спектр вариаций частоты определяется умножением фазового спектра на ω^2 [35]:

$$\varphi_{\Delta f}(\omega) = \omega^2 \varphi_s(\omega).$$

Следует иметь в виду, что определение частоты волны с точностью δf требует интервала времени длительностью не менее $1/2\pi\delta f$, что, естественно, искажает более быстрые флуктуации и усложняет понятие частоты. Описание флуктуаций частоты должно учитывать методику измерений.

Мелкомасштабные неоднородности можно измерять методом мерцаний. В теории флуктуаций интенсивности различают два режима: режим слабых мерцаний и режим сильных (насыщенных) мерцаний. В режиме слабых мерцаний связь между временным квадратичным спектром флуктуаций интенсивности точечного источника и спектром φ_{N_e} является линейной [11, 28]:

$$\frac{M_I(\omega)}{\langle I \rangle^2} = A_2 \left(\frac{f_0}{f} \right)^2 \int_0^{z_0} \frac{dz}{v_1} \int dq_y \sin^2 \left[\frac{(q_x^2 + q_y^2) a_\Phi^2}{2} \right] \times \\ \times \varphi_{N_e}(q_x, q_y, q_z = 0) \Big|_{q_x = \frac{2\pi\omega}{v_1}}, \\ a_\Phi = [(z_0 - z)z_0/zk]^{1/2}, \quad k = 2\pi f/c.$$

Важнейшей характеристикой спектра мерцаний является индекс мерцаний [11, 35]

$$m^2 = \frac{\langle (\Delta I)^2 \rangle}{\langle I \rangle^2} = \frac{1}{\langle I \rangle^2} \int d\omega M_I(\omega) = \frac{2}{\pi} A_2 \left(\frac{f_0}{f} \right)^2 \int_0^{z_0} dz a_\Phi (\Delta N_e)_{a_\Phi}^2, \\ a_\Phi (\Delta N_e)_{a_\Phi}^2 = \int d^2 q_\perp \sin^2 \left[\frac{(q_\perp a_\Phi)^2}{2} \right] \phi_{N_e}(q_\perp, q_z = 0) \simeq B_3 C_{N_e}^2 a_\Phi^{n-2}, \\ B_3 = \frac{\pi^2}{4\Gamma(n/2) \sin[(n-2)\pi/4]}.$$

Величину $(\Delta N_e)_{a_\Phi}$ можно трактовать как средний квадрат флуктуаций электронной концентрации неоднородностей с масштабом порядка масштаба Френеля a_Φ . Характерное значение масштаба Френеля $a_{\Phi,0}$ (при $R = R_0$) определяет пространственный масштаб флуктуаций интенсивности, а также временной масштаб. Для спектра φ_{N_e} вида (5.2) эквивалентная ширина спектра мерцаний равна

$$\omega_0 = \frac{m^2 \langle I \rangle^2}{M_I(0)} = B_4 \frac{\int_0^{z_0} dz a_\Phi^{n-2} C_{N_e}^2}{\int_0^{z_0} dz (a_\Phi^{n-1} C_{N_e}^2 / v_1)}, \\ B_4 = \frac{\Gamma[(n+1)/2] \sin[(n-1)\pi/4]}{\Gamma(n/2) \sin[(n-2)\pi/2]}.$$

При уменьшении элонгации ϵ индекс мерцаний возрастает, и, начиная с некоторого значения элонгации ϵ_0 , мерцания переходят в режим насыщения, где $m \approx 1$ для точечного источника или убывает для неточечного источника. В этом режиме связь между спектром мерцаний и спектром турбулентности является нелинейной.

В области малых масштабов неоднородностей информацию о турбулентном спектре получают также по измерению среднего распределения энергии по спектральной линии $I_f(\Delta f)$. Теория дает следующее соотноше-

ние для $I_f(\Delta f)$ для случая, когда исходное излучение монохроматическое [28]:

$$\begin{aligned} I_f(\Delta f) &= \int dt \exp[-2\pi i(\Delta f)t] B_E(t), \\ B_E(t) &= I_0 \exp[-\frac{1}{2}D_s(t)], \\ D_s(t) &= 2 \int d\omega [1 - \cos(2\pi\omega t)] \varphi_s(\omega), \end{aligned} \quad (5.4)$$

$\varphi_s(\omega)$ определяется соотношением (5.3); $B_E(t)$ — временная функция когерентности поля.

Для спектра вида (5.2) при малых значениях t D_s представима в виде $D_s \approx (t/t_0)^2$ и при $t_0 < l/v_1$ $I_f(\Delta f)$ представляет собой гауссиану. Информация о среде содержится только в параметре $\sqrt{\langle (\Delta f)^2 \rangle}$ — среднеквадратичной ширине линии:

$$\begin{aligned} \langle (\Delta f)^2 \rangle &= \frac{1}{(2\pi t_0)^2} = \frac{A_2}{(2\pi)^2} \left(\frac{f_0}{f} \right)^2 \int_0^{z_0} dz v_1^2 \frac{(\Delta N_e)_l^2}{l}, \\ (\Delta N_e)_l^2 &= \frac{l}{2\pi} \int d^2 q_1 \frac{(\mathbf{q}_1 \mathbf{v}_1)^2}{v_1^3} \varphi_{N_e}(\mathbf{q}_1, q_z = 0). \end{aligned} \quad (5.5)$$

При $t_0 > l/v_1$ D_s представима в виде $D_s = (t/t_1)^{n-2}$. В этом случае вид $I_f(\Delta f)$ зависит как от параметра n , так и от параметра t_1 . В качестве характерной ширины спектра можно использовать эквивалентную ширину [35]

$$\begin{aligned} (\Delta f)_{\text{экв}} &= \frac{1}{I_f(0)} \int d(\Delta f) I_f(\Delta f) = \frac{n-2}{2^{\frac{n-1}{n-2}} \Gamma(1/n-2)} \frac{1}{t_1} = \\ &= \frac{n-2}{2^{\frac{n-1}{n-2}} \Gamma(1/n-2)} \left\{ A_2 B_s \left(\frac{f_0}{f} \right)^2 \int_0^{z_0} dz C_{N_e}^2 v_1^{n-2} \right\}^{\frac{1}{n-2}}, \end{aligned}$$

$$B_s = \frac{\sqrt{\pi}(n/2-1)}{\Gamma(n-1)\Gamma(n/2)\sin[\pi(n-2)/2]}.$$

Аналогичная информация о турбулентности получается по измерению углового распределения рассеянного излучения. Если угол рассеяния θ_0 достаточно велик: $\theta_0 > l/R_0$, то распределение яркости по источнику представляется в виде гауссианы и характеристики среды содержатся в единственном параметре — среднем квадрате угла рассеяния:

$$\theta_0^2 = \langle \theta^2 \rangle = A_3 \left(\frac{f_0}{f} \right)^4 \int_0^{z_0} dz \left(1 - \frac{z}{z_0} \right)^2 \frac{(\Delta N_e)_l}{l}, \quad (5.6)$$

$$A_3 = 2A_2 c^2 / (2\pi f_0)^2 \approx 1,3 \cdot 10^{-15} \text{ см}^6,$$

где $(\Delta N_e)_l^2$ определяется соотношением (5.5).

Скорость движения дифракционной картины определяется из сопоставления терцианй на трех разнесенных радиотелескопах. Корреляцион-

ная функция мерцаний на двух разнесенных радиотелескопах в простейшем случае однородного движения представима в виде [11, 31]

$$B_I(\rho, t) = B_I(\rho - v_1 t),$$

где ρ — проекция разности координат двух радиотелескопов на картинную плоскость; t — разность времен измерения; v_1 — скорость дифракционной картины, которая равна проекции скорости движения среды на картинную плоскость. По измерениям на трех разнесенных радиотелескопах можно восстановить величину и направление скорости. Оценку величины скорости можно получить по характерному времени мерцаний, поскольку пространственный масштаб равен масштабу Френеля. Значение скорости можно получить также из сравнения угла рассеяния и характерной ширины спектральной линии.

Измерения скорости солнечного ветра. Рассмотрение свойств наблюдательной модели межпланетной плазмы начнем с анализа зависимости скорости v от расстояния до Солнца R . Прежде всего по синхронным наблюдениям мерцаний на трех разнесенных радиотелескопах получено, что в большом диапазоне гелиоцентрических расстояний и на всех гелиоширотах направление скорости солнечного ветра совпадает с радиальным направлением [9, 11]. Поэтому в дальнейшем мы будем писать вместо векторной величины v скалярную v . По тем же данным найдено, что в пределах элонгаций $\epsilon \approx 20 \div 90^\circ$ ($R \approx 0,15 \div 1$ а.е.) скорость солнечного ветра практически не зависит от расстояния до Солнца:

$$v(R) \approx \text{const} \approx 400 \text{ км/с}, \quad R > 30 R_\odot.$$

В более близких к Солнцу областях измерения скорости основаны на просвечивании среды излучением от передатчиков на космических аппаратах. Наиболее подробные данные получены в 1976 и 1984 гг. с помощью передатчика на космических аппаратах "Венера-10" (рис. 5.2), "Венера-15", "Венера-16" [36, 37]. Из рис. 5.2 видно, что зависимость v от R позволяет выделить в околосолнечной и межпланетной среде три зоны. В зоне $R < 10 R_\odot$ наблюдается рост v с R : от 30 км/с при $R = 2 R_\odot$ до 100 км/с при $R = 10 R_\odot$. Кинетическая энергия вещества в этой зоне меньше гравитационной энергии, плазма контролируется гравитационным полем Солнца, поэтому эту зону следует отнести к атмосфере Солнца — внешней короне Солнца. В дальнейшем эту зону будем называть, следуя Виткевичу, сверхкороной. Вторая зона заключена в небольшом интервале расстояний: $10\text{--}20 R_\odot$. В этой зоне наблюдается резкий рост v : от 100 км/с при $R = 10 R_\odot$ до 400 км/с при $R = 20 R_\odot$. Здесь приобретает основную кинетическую энергию текущее вещество, здесь же происходит переход скорости течения v через изотермическую скорость звука. В дальнейшем будем называть эту зону переходной областью. В третьей зоне при $R > 20 R_\odot$ вещество течет с примерно постоянной скоростью, оно не контролируется гравитационным полем Солнца и, следовательно, уже не принадлежит к атмосфере Солнца. В дальнейшем термин "межпланетная плазма" будем относить только к плазме в третьей зоне.

В соответствии с уравнением непрерывности для сферически-симметричного течения при постоянной скорости течения плотность вещества убывает

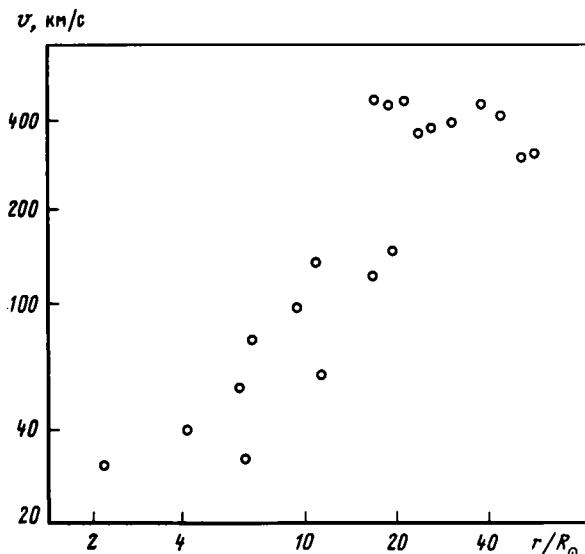


Рис. 5.2. Зависимость солнечного ветра от расстояния до Солнца [36]

обратно пропорционально квадрату расстояния:

$$N_e \propto 1/R^2, \quad R > 20 R_{\odot}. \quad (5.7)$$

Эта зависимость подтверждается также рядом прямых измерений.

Измерения спектра турбулентности. Большой цикл наблюдений временных спектров мерцаний радиисточников (в основном квазаров) показал, что при элонгациях $\epsilon > 10^\circ$ ($R > 40 R_{\odot}$) наблюдательные данные наилучшим образом соответствуют чисто степенному виду пространственного спектра флуктуаций электронной концентрации в диапазоне пространственных частот, соответствующих масштабам от нескольких тысяч до нескольких десятков километров [11]. Пример спектра мерцаний радиисточника 3C 147 на частоте $f = 102$ МГц при элонгации источника $\epsilon = 50^\circ$ показан на рис. 5.3 (точки — данные наблюдений, сплошная линия — теоретический спектр при φ_{N_e} , определяемом (5.2)) [11]. Измерения спектра вариаций фазы показали, что спектр вида (5.4) продолжается в сторону низких пространственных частот вплоть до частоты, соответствующей масштабу 10^6 км [11].

На малых элонгациях $\epsilon < 5^\circ$ ($R < 20 R_{\odot}$) основные результаты получены с помощью космических аппаратов по измерению фазовых вариаций и вариаций частоты радиоволны [36, 37]. Этим данным также удовлетворяет степенной спектр вида (5.2), но при другом показателе степени ($n \approx 3,0$). Вместе с тем на этих элонгациях обнаружено существование внутреннего масштаба турбулентности l [37], т.е. существенное возрастание крутизны спектра на частотах, больших $1/l$. Масштаб l растет с ростом R :

$$l \propto R^\alpha; \quad \alpha \approx 2; \quad (5.8)$$

при $R = 20 R_{\odot}$ $l \approx 20$ км.

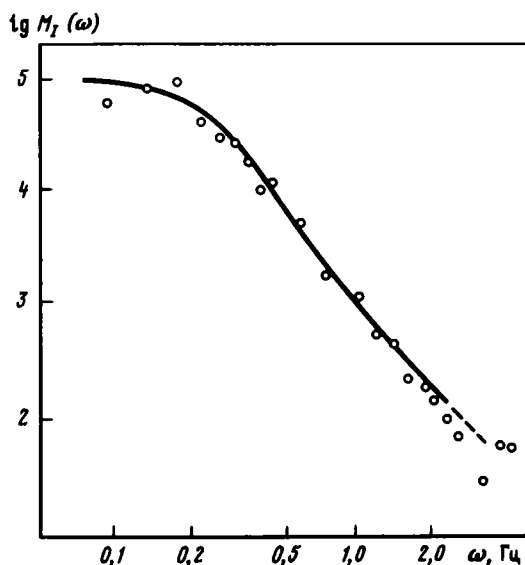


Рис. 5.3. Спектр мерцаний $M_I(\omega)$ источника ЗС 147 (ω — частота мерцаний)

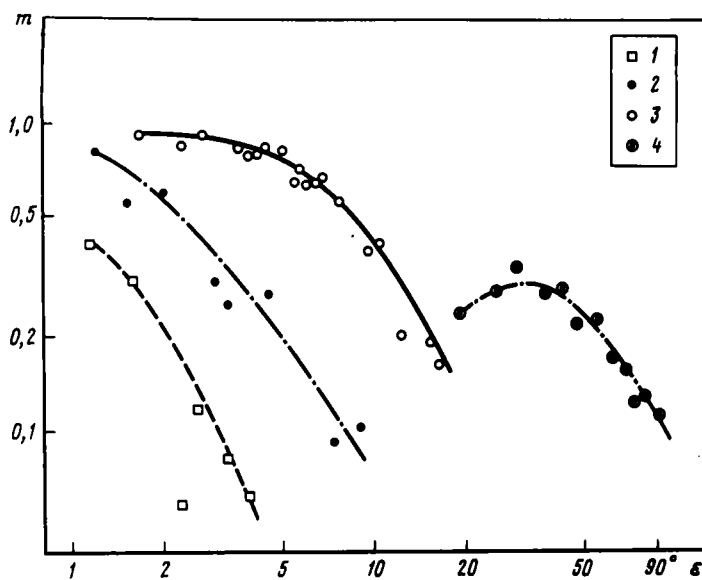


Рис. 5.4. Зависимости индекса мерцаний m от элонгации ϵ по наблюдениям на разных длинах радиоволн λ [38–40]

1 — $\lambda = 1,35$ см; 2 — 4 см; 3 — 32 см; 4 — 3,5 м

Зависимость индекса мерцаний радиоисточника от элонгации характеризуется изменением $C_{N_e}^2$ от расстояния R . Примеры зависимости m от ϵ приведены на рис. 5.4 [21, 37–40]. Прекращение роста $m(\epsilon)$ при приближении источника к Солнцу связано с переходом мерцаний в режим насыщения. Несколько меньшие значения m при $\lambda = 3,5$ м связаны с влиянием конечных угловых размеров источника. Данные наблюдений при $\epsilon \gtrsim 10^\circ$ соответствуют следующей зависимости $(\Delta N_e)_{a\Phi}^2$ (среднего квадрата флуктуаций электронной концентрации неоднородностей с масштабом порядка масштаба Френеля):

$$(\Delta N_e)_{a\Phi}^2 \propto C_{N_e}^2 \propto R^{-4}.$$

Поскольку зависимость N_e^2 от R определяется таким же законом (см. (5.7)), то в среднем отношение $(\Delta N_e)_{a\Phi}^2 / N_e^2$ не зависит от расстояния.

Резюмируя изложенное, мы можем представить спектр флуктуаций электронной концентрации в виде (5.2). При $R = 1$ а.е. $L \approx 10^6$ км, на более близких к Солнцу расстояниях $L > 10^5$ км. При $R < 20 R_\odot$ l определяется соотношением (5.8), при больших расстояниях зависимость l от R становится более слабой. При $R = 1$ а.е. $l \approx 100$ км. Показатель спектра n несколько растет с ростом R :

$$n \approx \begin{cases} 3,0 & R < 20 R_\odot, \\ 3,5 \div 3,6, & R > 20 R_\odot. \end{cases}$$

Наиболее сильной зависимостью от R обладает коэффициент $C_{N_e}^2$, который пропорционален $\langle (\Delta N_e)^2 \rangle$ — среднему квадрату флуктуаций электронной концентрации неоднородностей с масштабом порядка L :

$$C_{N_e}^2 \propto \begin{cases} R^{-4}, & R > 20 R_\odot, \\ R^{-3}, & R < 20 R_\odot. \end{cases} \quad (5.9)$$

В межпланетной плазме ($R > 20 R_\odot$) выполняется приближенное соотношение

$$\frac{C_{N_e}^2 L^{n-3}}{B_1} = \langle (\Delta N_e)^2 \rangle \approx (0,1 \div 0,3) N_e^2,$$

в свержкороне Солнца ($R < 10 R_\odot$)

$$\langle (\Delta N_e)^2 \rangle \ll N_e^2.$$

Информацию о зависимости параметров спектра турбулентности от расстояния до Солнца в свержкороне можно получить также по зависимости среднего квадрата угла рассеяния $\langle \theta^2 \rangle$ от ϵ . Суммарным данным [41] соответствует зависимость

$$\langle \theta^2 \rangle \propto \epsilon^{-3,2}; \quad (5.10)$$

$\langle \theta^2 \rangle$ определяется соотношением (5.6): $\langle \theta^2 \rangle \propto C_{N_e}^2 / l^{4-n}$, в целом зависимость (5.10) можно согласовать с (5.8) и (5.9), хотя это согласование получается с натяжкой. По-видимому, данные по зависимости l от R требуют дополнительной проверки.

Важным результатом измерений углов рассеяния является вытянутость видимых угловых размеров источника в направлении, нормальном радиальному направлению, на основании чего был сделан вывод о существовании магнитного поля с силовыми линиями, вытянутыми в радиальном направлении. Существование магнитного поля в свехкороне подтверждено также по поляризационным измерениям фарадеевского вращения [42].

Механизм формирования турбулентности межпланетной плазмы. Детальные измерения, проведенные на космических аппаратах, показывают, что вблизи орбиты Земли флуктуации межпланетной плазмы с масштабом порядка L связаны с МГД-волнами и разрывами, причем волны и разрывы вносят сравнимый вклад [11]. Однако на меньших масштабах разрывы не могут давать существенный вклад, поскольку случайной совокупности разрывов соответствует спектр вида (5.7) с показателем $n = 4$. Как мы видели выше, реальный спектр является более плоским, поэтому на масштабах, меньших L , основной вклад в спектр неоднородностей межпланетной плазмы могут давать только МГД-волны.

В соответствии с моделью, разработанной в [33, 43, 44], основным источником энергии турбулентности межпланетной плазмы являются альвеновские волны, генерируемые в верхней хромосфере Солнца в условиях сильной турбулентности. Формирование наблюдаемого спектра неоднородностей происходит за счет нелинейного взаимодействия трех типов волн: альвеновских (a), быстрых (m) и медленных (s) магнитозвуковых волн. Эти процессы можно описать в рамках теории слабой плазменной турбулентности.

В свехкороне энергетическим источником наблюдаемого спектра неоднородностей являются высокочастотные волны (с временными частотами, много большими ω_0 — основной частоты солнечной атмосферы; ей соответствует пятиминутный период колебаний), которые выносятся из нижней короны конвективным потоком корональной плазмы. Нелинейные процессы приводят к дрейфу частоты a -волны в сторону низких частот с порождением при этом m - и s -волн. Наблюдаемые неоднородности электронной концентрации связаны с s -волнами. Теоретический спектр соответствует спектру вида (5.2) при $n = 3$. Внутренний масштаб l примерно равен ларморовскому радиусу ионов.

Низкочастотные альвеновские волны (с частотами, меньшими ω_0) проходят свехкорону почти без поглощения. Они являются энергетическим источником турбулентности межпланетной плазмы. Эволюцию волн в межпланетной плазме необходимо рассматривать с учетом их распространения в неоднородной движущейся среде. Основной масштаб турбулентности L определяется из условия равенства времени выноса волны солнечным ветром и времени свободного пробега волны, определяемого нелинейными взаимодействиями. Волны с масштабами, меньшими L , не могут прийти непосредственно от Солнца, они возникают за счет нелинейных взаимодействий. При нелинейных (трехволновых) взаимодействиях происходит перекачка энергии от крупномасштабных неоднородностей к мелкомасштабным, на самых мелких масштабах происходит диссипация волновой энергии в тепло. В межпланетной среде s -волны сильно затухают, поэтому основными компонентами турбулентности являются a - и m -волны. Флуктуа-

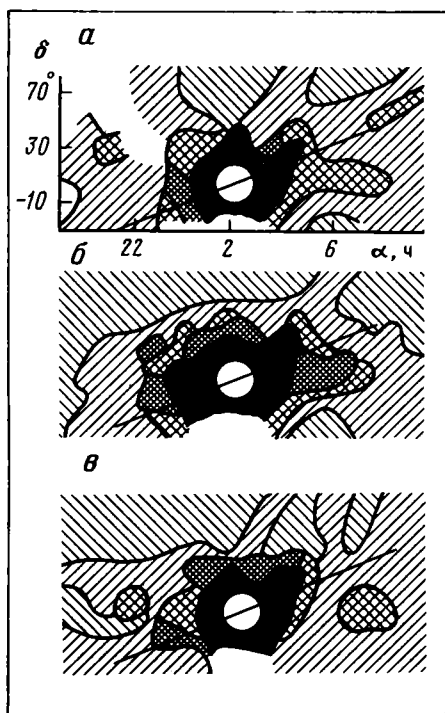


Рис. 5.5. Карты распределения индексов межпланетных мерцаний

$a - 28.04.76$ г.; $б - 29.04.76$ г.; $в - 30.04.76$ г. Усиление плотности штриховки соответствует увеличению значений индексов мерцаний [11]

ции электронной концентрации связаны с m -волнами. Теоретический спектр соответствует спектру вида (5.6) при $n = 3,5$.

Альвеновские волны с частотами, близкими ω_0 , являются основными источниками нагрева короны и ускорения солнечного ветра. Нагрев короны связан с линейным столкновительным затуханием части волн на расстоянии $R = (1,5 \div 2) R_{\odot}$ (от центра Солнца); ускорение солнечного ветра связано с нелинейным поглощением волн на расстоянии $R \approx 10 R_{\odot}$. Формирование короны, солнечного ветра и турбулентности следует рассматривать самосогласованно. Такое самосогласованное рассмотрение показывает, что основным параметром, который определяет структуру короны, сверхкороны и межпланетной плазмы, является напряженность магнитного поля [45].

Изменения средней структуры межпланетной плазмы с циклом солнечной активности. Как мы уже упоминали, радиоастрономия позволяет наблюдать в течение небольшого промежутка времени большое количество радиоисточников и строить общую карту распределения параметров турбулентной межпланетной плазмы. В настоящее время такая возможность реализована для карт распределения индексов мерцаний. Напомним, что

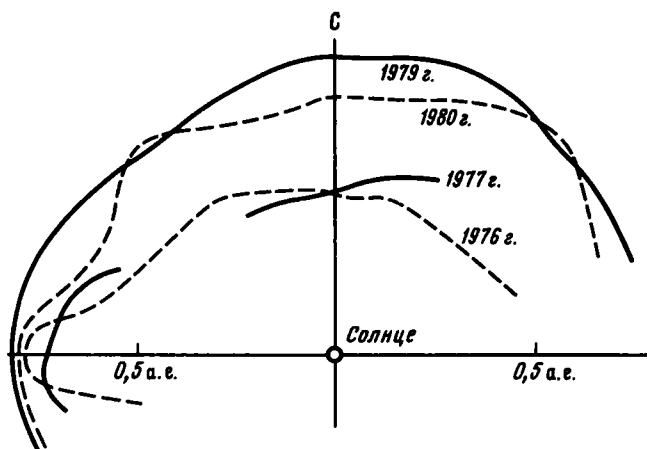


Рис. 5.6. Изменения структуры межпланетной плазмы с циклом солнечной активности. Линиями отмечены уровни с одинаковыми индексами мерцаний [46]

индекс мерцаний характеризует величину $\int da_{\Phi} (\Delta N_e)^2 a_{\Phi}$, аналогичную мере эмиссии. Вообще говоря, индекс мерцаний радиоисточника зависит также от углового распределения яркости по источнику и для построения карт используется специальная техника нормировки – приведение наблюдаемого индекса мерцаний к индексу мерцаний точечного источника. Пример карт распределения индексов мерцаний показан на рис. 5.5 [11], из которого видно, во-первых, сильную зависимость индекса мерцаний от расстояния до Солнца R , во-вторых, заметную угловую (гелиоширотную) структуру, в-третьих, заметную переменность день ото дня. В этом пункте мы обсудим годовые вариации. На рис. 5.6 приведены изолинии среднегодовых индексов мерцаний, полученных для разных лет [46]. В год максимума солнечной активности структура распределения электронной концентрации межпланетной плазмы близка к сферически-симметричной, а в год минимума она сплюснута в полярных направлениях, причем все изменения с циклом солнечной активности происходят в полярных областях. В экваториальных областях изменений не происходит. Качественно аналогичные результаты получены для сверхкороны [47]. Оптические наблюдения дают аналогичный результат и для короны.

Таким образом, структура межпланетной плазмы повторяет структуру короны и сверхкороны, что говорит о генетической связи этих трех образований.

Данные по измерению скоростей солнечного ветра также показывают, что изменения скорости с циклом солнечной активности происходят в основном в полярных областях [46]. В период максимума солнечной активности распределение скоростей солнечного ветра близко к сферически-симметричному и, как мы уже отмечали, $v \approx 400$ км/с. В год минимума солнечной активности скорость в полярных направлениях увеличивается примерно в 1,5 раза, достигая 600–700 км/с.

Годичные вариации v и среднего индекса мерцаний $\langle m \rangle$ происходят таким образом, что сохраняется величина $\langle m \rangle v$ [46]. Эта величина не за-

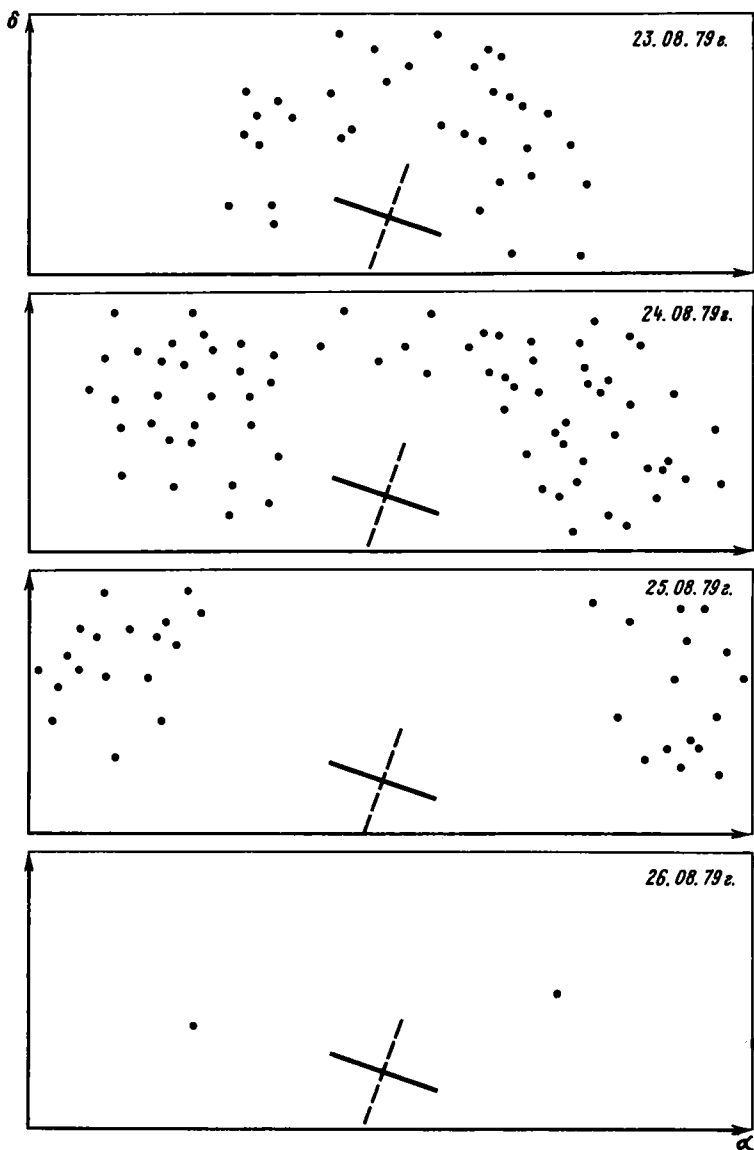


Рис. 5.7. Пример прохождения ударной волны через межпланетную плазму

Точками отмечены положения радиисточников, у которых наблюдалось увеличение индекса мерцаний по сравнению со значением индекса мерцаний в предыдущий день [49]. Сплошная линия – положение плоскости солнечного экватора; штриховая – положение оси вращения Солнца

висит ни от гелиошироты, ни от времени (на масштабах порядка года). Закон сохранения величины $\langle m \rangle$ можно трактовать как закон сохранения потока массы, поскольку флуктуации электронной концентрации пропорциональны средней концентрации:

$$\rho(t) v(t) \approx \text{const.}$$

Эта величина не зависит ни от гелиошироты, ни от времени.

Возмущения в межпланетной плазме. Из рис. 5.5 видно, что картина распределения вещества в межпланетном пространстве далека от сферически-симметричной, она имеет все время возмущенную структуру, причем эта структура может существенно измениться за сутки. Среди возмущений в межпланетной плазме можно выделить два типа структур, которые имеют важнейшее значение [48].

Первый тип — коротирующие структуры. Эти структуры связаны с длительно существующими на Солнце источниками возмущений и вращаются вместе с Солнцем (здесь следует отметить, что вращаются только конфигурации структур, а вещество в них движется радиально от Солнца). Этим структурам соответствуют характерные времена изменения индексов мерцаний 3–5 сут — характерное время прохождения коротирующей структуры через эффективную область пространства, зондируемую данным источником, размеры такой области по гелиодолготе составляют примерно 60° .

Второй тип возмущений — распространяющиеся явления. Они вызываются кратковременными событиями на Солнце. Наиболее ярким примером распространяющихся явлений служат межпланетные ударные волны, генерируемые вспышками на Солнце. Пример прохождения ударной волны через межпланетное пространство показан на рис. 5.7 [49]. Здесь точками отмечены положения источников, которые показывают прирост величины индекса мерцаний относительно предыдущего дня. Как видно из рисунка, возможность охватить явление в целом — огромное преимущество радиоастрономических методов перед другими. Этими методами удалось изучить эволюцию скорости ударного фронта с удалением от Солнца. На расстояниях, больших 0,2–0,3 а.е. от Солнца, скорость ударной волны замедляется с ростом R , причем для сильных ударных волн закон замедления является более сильным, чем предсказывает теория. Следует отметить, что вообще теория возмущений в межпланетной плазме слабо разработана и здесь имеется обширное перспективное поле деятельности.

Корреляционный анализ ежедневных вариаций индексов мерцаний показал, что распространяющиеся явления имеют конечные угловые размеры: их средний угловой размер составляет примерно 60° в гелиодолготном сечении и 45° в гелиоширотном сечении. В радиальном направлении характерный масштаб распространяющегося явления равен 0,2–0,3 а.е. [50].

Проблема предсказания времени прихода возмущения в околоземное космическое пространство и влияния, которое возмущение окажет на Землю, — одна из самых актуальных проблем, не решенных в настоящее время. Поскольку радиоастрономические данные дают информацию о состоянии межпланетной плазмы на более близких к Солнцу расстояниях, чем Земля, то возникает возможность использования этих данных для прогнозирования геофизических проявлений солнечной активности. Характерное время

опережения прогноза для коротирующих возмущений — примерно 6–7 сут, для распространяющихся возмущений — примерно 1 сут. Сопоставление средних значений индексов мерцаний, усредненных по всем источникам, $\langle m \rangle$ и A_p -индексов геомагнитной активности показало, что за период 1976–1980 гг. между этими рядами данных имеется достаточно хорошая корреляция (на уровне 0,6–0,7) [51]. Опережение радиоастрономических данных составляло примерно 1 сут; из этого наблюдательного факта следуют два вывода. Во-первых, в период 1976–1985 гг. преобладали распространяющиеся возмущения; во-вторых, турбулентность межпланетной плазмы играет значительную роль в передаче возмущений от Солнца к Земле.

В целом имеется хорошая перспектива использования радиоастрономических наблюдений мерцаний радиисточников для решения важной прикладной задачи: повышения точности прогноза земных проявлений солнечной активности.

ЛИТЕРАТУРА

Глава 1

1. Столетов А.Г. Избранные сочинения. М.: Гостехиздат, 1950. 341 с.

2. Хей Дж. Радиовселенная / Пер. с англ. Б.Н. Пановкина. М.: Мир, 1978. 283 с.

3. Христиансен У., Хёгбом И. Радиотелескопы / Пер. с англ. под ред. А.А. Пистолькорса. М.: Мир, 1972. 237 с.

4. Есепкина Н.А., Корольков Д.В., Парийский Ю.Н. Радиотелескопы и радиометры. М.: Наука, 1973. 415 с.

5. Цейтлин Н.М. Антенная техника и радиоастрономия. М.: Сов. радио, 1976. 350 с.

6. Хайкин С.Э. Радиоастрономические инструменты // Тр. 5-го совещ. по вопросам космогонии, 9–12 марта 1955 г. М.: Изд-во АН СССР, 1956. С. 9–13.

7. Виткевич В.В. Радиоизлучения и методы их исследования // Астрон. журн. 1957. Т. 34, № 3. С. 349–364.

8. Хайкин С.Э., Кайдановский Н.Л. Новый радиотелескоп высокой разрешающей силы // ПТЭ. 1959. № 2. С. 19–24.

9. Очерки истории радиоастрономии в СССР: Сб. науч. тр. Киев: Наук. думка, 1985. 280 с.

10. Калачев П.Д., Саломонович А.Е. Радиотелескоп ФИАН СССР с 22-метровым параболическим рефлектором // РЭ. 1961. Т. 6, № 3. С. 422–429.

11. Кугушев А.М., Калачев П.Д., Паршиков А.А. и др. Антенны РТ-7, 5 радиотелескопа миллиметровых волн МВТУ // Антенны / Под ред. А.А. Пистолькорса. М.: Связь, 1980. Вып. 28. С. 3–13.

12. Сагдеев Р.З., Кремнев Р.С., Линкин В.М. и др. Аэростатный эксперимент проекта ВЕГА // Письма в "Астрон. журн." 1986. Т. 12. С. 10–15.

13. Калачев П.Д. Жесткость параболического рефлектора, нагруженного собственным весом (вертикальное положение) // Диапазонный крестообразный радиотелескоп. М.: Наука, 1967. С. 60–70. (Тр. ФИАН; Т. 38).

14. Höerner S.von. Design of large steerable antennas // Astron. J. 1967. Vol. 72, № 2. P. 35–47.

15. Калачев П.Д., Козлов А.Н., Тарасов В.Б. и др. Согласованные деформации зеркальных систем полноповоротных радиотелескопов // Радиотелескопы субмиллиметровые и рентгеновские телескопы. М.: Наука, 1974. С. 128–130. (Тр. ФИАН; Т. 77).

16. Козлов А.Н., Тарасов В.Б., Титов В.Н. и др. Зеркальная схема радиотелескопа РТ-70 // Изв. вузов. Радиофизика. 1973. Т. 16, № 12. С. 1909–1913.

17. Богомолов А.Ф., Попереченко Б.А., Соколов А.Г. Следящий параболический радиотелескоп ТНА-1500 диаметром 64 м // Антенны / Под ред. А.А. Пистолькорса. М.: Радио и связь, 1982. Вып. 30. С. 3–13.

18. Калачев П.Д. Проблемы создания параболической антенны высокой разрешающей способности // Радиотелескопы. М.: Наука, 1965. С. 51–89. (Тр. ФИАН; Т. 28).

19. Калачев П.Д., Саломонович А.Е. Радиотелескоп с 22-метровым рефлектором (конструкция, монтаж и юстировка) // Радиоастрономия. М.: Наука, 1962. С. 13–41. (Тр. ФИАН; Т. 17).

20. Иванов В.И., Моисеев И.Г., Монин Ю.Г. Новый радиотелескоп Крымской астрофизической обсерватории АН СССР с 22-метровым параболическим рефлектором // Изв. КРАО. 1967. Т. 38. С. 141–148.

21. Akabane K., Morimoto M., Kaifu V. et al. The Nobeyama radio observatory //

Sky and Telescope. 1983. Vol. 66, № 6. P. 495–499.

22. Парщиков А.А., Розанов Б.А., Сагатов В.Г. и др. Методика выверки и технология изготовления радиотелескопа РТИ-7,5/250 МВТУ // Изв. вузов. Радиофизика. 1973. Т. 16. № 5. С. 605–608.

23. Мешанский Ф.Л. Исследование отражающей поверхности большого радиотелескопа геодезическими методами // Вопр. радиоэлектроники. Сер. 12. 1964. Вып. 26. С. 24–41.

24. Поляк В.С., Соколов А.Г. Конструкция зеркального радиотелескопа ТНА-1500 // Антенны / Под ред. А.А. Пистолькорса. М.: Радио и связь, 1982. Вып. 30. С. 13–26.

25. Бахрах Л.Д. Многозеркальные антенны: Дис. ... д-ра техн. наук. М.: МГУ, 1958. 465 с.

26. Кинбер Б.С. О зеркальных антеннах // РЭ. 1962. Т. 7, № 6. С. 973–980.

27. Айзенберг Г.З., Ямпольский В.Г., Терешин О.Н. Антенны УКВ. М.: Связь, 1977. Ч. 2. С. 58–74.

28. Попереченко Б.А., Фейзула Н.М. Компенсация систематических весовых деформаций зеркальной системы параболических радиотелескопов // Антенны / Под ред. А.А. Пистолькорса. М.: Связь, 1969. Вып. 6. С. 135–148.

29. Саломонович А.Е., Соболева Н.С. К расчету двухзеркального телескопа // РЭ. 1959. Т. 4, № 5. С. 799–815.

30. Бахрах Л.Д., Григорьева М.Н., Кузьмин А.Д. и др. Многозеркальная схема антенны радиотелескопа РТ-22 ФИАН // Изв. вузов. Радиофизика. 1969. Т. 12, № 8. С. 1109–1115.

31. Бахрах Л.Д., Григорьева М.И., Коган Л.Р. и др. Параметры антенны радиотелескопа РТ-22 КРАО на волнах 3 и 1,35 см // Там же. 1973. Т. 16, № 5. С. 675–680.

32. Введенский В.А., Калачев П.Д., Кузьмин А.Д. и др. Прецизионная система управления радиотелескопом РТ-22 ФИАН // Техника и методы радиоастрономического приема. М.: Наука, 1977. С. 45–49. (Тр. ФИАН; Т. 93).

33. Попереченко Б.А., Гиппиус А.А., Клюев О.Л. и др. Система наведения радиотелескопа ТНА-1500 // Антенны / Под ред. А.А. Пистолькорса. М.: Радио и связь, 1982. Вып. 30. С. 27–36.

34. Илясов Ю.П. Динамика развития радиоастрономии. Ч. 2. Создание радиотелескопов. М., 1981. С. 3–45. (Препр. / ФИАН СССР; № 165).

35. Пистолькорс А.А., Кузьмин С.О. Современные радиотелескопы миллиметровых волн // Антенны / Под ред. А.А. Пистолькорса. М.: Радио и связь, 1982. Вып. 30. С. 36–46.

36. Матвеев Л.И. Радиотелескопы США // Антенны / Под ред. А.А. Пистолькорса. М.: Связь, 1972. Вып. 14. С. 3–24.

37. Smith D.H. Submillimeter giants // Sky and Telescope. 1985. Vol. 70, № 2. P. 119–123.

38. Асланян А.М., Гулян А.Г., Козлов А.Н. и др. Измерения основных параметров антенны РТ-70 // Изв. вузов. Радиофизика. 1984. Т. 27, № 5. С. 543–549.

39. Монин Ю.Г. Определение упругих деформаций рефлектора радиотелескопа РТ-22 Крымской астрофизической обсерватории АН СССР // Изв. КРАО. 1970. Т. 41/42. С. 260–263.

40. Саломонович А.Е. Некоторые результаты исследований, выполненных на радиотелескопе РТ-22 // Радиоастрономия. М.: Наука, 1962. С. 42–83. (Тр. ФИАН; Т. 17).

41. Карачун А.М., Кузьмин А.Д., Саломонович А.Е. Исследование некоторых параметров антенны 22-метрового радиотелескопа ФИАН СССР // РЭ. 1961. Т. 6, № 3. С. 430–436.

42. Бахрах Л.Д., Берулис И.И., Григорьева М.И. и др. Исследование электрических параметров радиотелескопа РТ-22 ФИАН на волне 1,35 см // XI Всесоюз. радиоастрономическая конф. по аппаратуре, антеннам и методам: Тез. докл. Ереван: Изд-во АН АрмССР, 1978. С. 137–138.

43. Ефанов В.А., Зинченко И.И., Кисляков А.Г. и др. Наблюдения источников космического радиоизлучения на волне 3,9 мм // Изв. КРАО. 1975. Т. 53. С. 144–149.

44. Загитин В.И., Мисежников Г.С., Пузанов В.А. и др. Радиометр для спектральных измерений в диапазоне 8 мм с квантовым парамагнитным усилителем // ПТЭ. 1968. № 5. С. 118–121.

45. Матвеев Л.И., Сагдеев Р.З., Балебанов В.М. и др. Сверхдальноя радиоинтерференционная сеть на волне 18 см // Письма в "Астрон. журн." 1986. Т. 12. С. 59–65.

46. Калачев П.Д., Назаров В.П., Парщиков А.А. и др. Зеркальный радиотелескоп РТИ-7,5/250 с полноповоротной параболической антенной // Радио-

телескопы субмиллиметровые и рентгеновские телескопы. М.: Наука, 1974. С. 193–210. (Тр. ФИАН; Т. 77).

47. *Парщиков А.А., Емельянов И.А.* Система синхронно-следающего привода радиотелескопа РТИ-7,5/250 МВТУ // Там же. С. 187–192.

48. *Парщиков А.А., Розанов Б.А., Соловьев Г.Н.* Исследование электрических характеристик восточной антенны РТ-7,5 МВТУ диапазона коротких миллиметровых волн // XIV Всесоюз. конф. по радиоастрономии: Тез. докл. Ереван: Изд-во АН АрмССР, 1982. С. 196–197.

49. *Богомолов А.Ф., Соколов А.Г., Попереченко Б.А.* и др. О проблеме создания современных экономических радиотелескопов // Антенны / Под ред. А.А. Пистолькорса. М.: Связь, 1976. Вып. 24. С. 106–123.

50. *Попереченко Б.А., Попов Ю.В., Волконский В.Б.* и др. Методика и аппаратура высокоточного контроля зеркала радиотелескопа ТНА-1500 // Антенны / Под ред. А.А. Пистолькорса. М.: Радио и связь, 1984. Вып. 31. С. 28–35.

51. *Елисеев Б.Ф., Козлов А.Н., Тарасов В.Б.* и др. Некоторые вопросы расчета двухзеркальных симметричных квазипараболических антенн с излучателями сферической волны // Тр. НИИП. 1969. Вып. 4 (116). С. 41–49.

52. *Князев И.Н., Викторов О.С., Рысков Б.П.* и др. Антенная установка с диаметром зеркала 70 м (РТ-70) // Антенны / Под ред. А.А. Пистолькорса. М.: Радио и связь, 1984. Вып. 31. С. 4–16.

53. *Козлов А.Н., Тарасов В.Б., Гришмановский В.А.* и др. Расчет и экспериментальные исследования радиотехнических характеристик антенны РТ-70 // Там же. С. 17–28.

54. *Бахрах Л.Д., Вавилова И.В.* Сферические двухзеркальные антенны // РЭ. 1961. Т. 6, № 7. С. 1146–1156.

55. *Геруни П.М.* Вопросы расчета сферических двухзеркальных антенн // Там же. 1964. Т. 9, № 1. С. 3–12.

56. *Геруни П.М.* Радиотелескоп РТ-32/54 и ОСА-18 // XIV Всесоюз. конф. по радиоастрономии: Тез. докл. Ереван: Изд-во АН АрмССР, 1982. С. 188–189.

57. *Геруни П.М.* Пятиметровая сферическая антенна миллиметрового диапазона // Антенны / Под ред. А.А. Пистолькорса. М.: Связь, 1968. Вып. 4. С. 3–15.

58. *Саркисян Р.С.* Конструкция малого зеркала радиотелескопа РТ-32/54 // XIV Всесоюз. конф. по радиоастроно-

мии: Тез. докл. Ереван: Изд-во АН АрмССР, 1982. С. 190–191.

59. *Адамян Р.М., Казарян Э.В., Погосян А.С.* Механизмы вращения радиотелескопа РТ-32/54 // Там же. С. 192–193.

60. *Аракелян М.Г.* Определение допусков на изготовление радиотелескопа РТ-32/54 // Там же. С. 194–195.

61а. *Саломонович А.Е., Бакун В.Н., Ковалев В.С.* и др. Субмиллиметровый телескоп для орбитальной пилотируемой станции "Салют-6" // Радиотехника. 1979. Т. 34, № 5. С. 33–40.

61б. *Саломонович А.Е., Сидякина Т.М., Хайкин А.С.* и др. Автоматический трехкаскадный гелиевый рефрижератор для охлаждения приемников излучения субмиллиметрового телескопа БСТ-1М орбитальной пилотируемой станции "Салют-6" // Космич. исслед. 1981. Т. 19. С. 154.

62. *Заксон М.Б., Кардашев Н.С., Савин А.И.* и др. Первый радиотелескоп в космосе // Земля и Вселенная. 1980. Т. 4. С. 2–9.

63. *Глазман В.Н., Кисляков А.Г., Мосолов И.В.* Неподвижный радиотелескоп миллиметрового диапазона волн // Изв. вузов. Радиофизика. 1971. Т. 14, № 4. С. 663–672.

64. *Кисляков А.Г., Чернышев В.И.* Пассажный радиотелескоп миллиметрового диапазона волн // Антенны / Под ред. А.А. Пистолькорса. М.: Связь, 1975. Вып. 21. С. 3–18.

65. *Кисляков А.Г., Чернышев В.И., Носов А.А.* и др. Электрические параметры и система наведения радиотелескопа РТ-25х2 // Изв. вузов. Радиофизика. 1973. Т. 16, № 9. С. 1409–1417.

66. *Кисляков А.Г., Куликов Ю.Ю., Федосеев Л.И.* и др. Наблюдения Солнца на волнах 1,4 мм и 4,1 мм с угловым разрешением 13" и 40" // Письма в "Астрон. журн.". 1975. Т. 1, № 4. С. 24–28.

67. *Парийский Ю.Н., Хайкин С.Э.* О требованиях, которые должны быть предъявлены к большим радиотелескопам с точки зрения задач радиоастрономии // Изв. ГАО АН СССР. 1960. № 164. С. 27–44.

68. *Хайкин С.Э., Кайдановский Н.Л., Есепкина Н.А.* и др. Большой пулковский радиотелескоп // Там же. С. 3–26.

69. *Шиврис О.Н., Парийский Ю.Н.* О возможности увеличения разрешающей силы Большого пулковского радио-

телескопа // Изв. ГАО АН СССР. 1970. № 185. С. 191–201.

70. *Парийский Ю.Н., Шиврис О.Н.* Методы радиоастрономического использования РАТАН-600 // Там же. 1972. № 188. С. 13–39.

71. *Кайдановский Н.Л.* О возможности расширения наблюдаемой области неба при использовании зенитного облучателя РАТАН-600 // *Астрофиз. исслед.* 1982. С. 100–107. (Изв. САО АН СССР; № 16).

72. *Есепкина Н.А., Кайдановский Н.Л., Кузнецов Б.Г., и др.* Исследование характеристик излучения остронаправленных зеркальных антенн с отражателем переменного профиля // *РЭ.* 1961. Т. 6, № 12. С. 1947–1960.

73. *Бахвалов Н.С., Васильева Л.Г., Есепкина Н.А. и др.* Поляризационные характеристики антенны переменного профиля // *Астрофиз. исслед.* 1973. С. 135–149. (Изв. САО АН СССР; № 5).

74. *Брауде Б.В., Есепкина Н.А., Кайдановский Н.Л. и др.* Исследование влияния случайных ошибок на электрические характеристики остронаправленных зеркальных антенн с отражателями переменного профиля // *РЭ.* 1960. Т. 5, № 4. С. 584–596.

75. *Есепкина Н.А., Парийский Ю.Н.* Особенности работы АПП при наблюдении вблизи зенита // Изв. ГАО АН СССР. 1971. № 188. С. 58–62.

76. *Берлин А.Б., Гассанов Л.Г., Гольнев В.Я. и др.* Эксперимент "холод". Первый глубокий обзор неба на радиотелескопе РАТАН-600 // *Сообщ. САО АН СССР.* 1984. Вып. 41. С. 13–25.

77. *Корольков Д.В., Парийский Ю.Н.* Шумы неба и чувствительность наземных радиотелескопов // Изв. вузов. Радиофизика. 1968. Т. 11, № 12. С. 1773–1781.

78. *Стоцкий А.А.* Аберрация главного зеркала антенны переменного профиля и сканирование диаграммы направленности путем смещения облучателя // Изв. ГАО АН СССР. 1972. № 188. С. 63–76.

79. *Кайдановский Н.Л.* Сопровождение источников радиоизлучения при наблюдениях с помощью антенны переменного профиля // *Астрофиз. исслед.* 1975. С. 214–222. (Изв. САО АН СССР; № 7).

80. *Кайдановский Н.Л.* Длительные экспозиции и азимутальный апертурный синтез источников радиоизлучения на

радиотелескопе РАТАН-600 при движении облучателя на круговом рельсовом пути // Там же. 1986. С. 85–88. (Изв. САО АН СССР; № 23).

81. *Соболева Н.С., Шиврис О.Н.* О возможности наблюдений на антеннах переменного профиля источников с различными высотами при неподвижном облучателе // *Сообщ. САО АН СССР.* 1974. Вып. 12. С. 51–64.

82. *Голубчина О.А., Голубчин Г.С.* Метод "эстафеты" // *Астрофиз. исслед.* 1981. С. 125–131. (Изв. САО АН СССР; № 14).

83. *Голубчина О.А.* Метод "эстафеты" с зонированием // Там же. 1986. С. 75–84. (Изв. САО АН СССР; № 21).

84. *Хайкин С.Э., Кайдановский Н.Л., Парийский Ю.Н. и др.* Радиотелескоп РАТАН-600 // Изв. ГАО АН СССР. 1972. № 188. С. 3–12.

85. *Хайкин С.Э., Кайдановский Н.Л., Парийский Ю.Н. и др.* Рефлекторный радиотелескоп с разрешающей способностью 15 секунд дуги // *ДАН СССР.* 1969. Т. 185, № 4. С. 755–777.

86. *Гельфрейх Г.Б., Зверев Ю.К., Стоцкий А.А. и др.* Юстировка антенны переменного профиля // Изв. ГАО АН СССР. 1972. № 188. С. 123–127.

87. *Парийский Ю.Н.* Контроль параметров антенны по радиоастрономическим наблюдениям // Там же. С. 149–151.

88. *Ходжамухамедов Н., Стоцкий А.А., Боровик В.И.* Автоколлимационный метод юстировки и контроля антенны переменного профиля // *РЭ.* 1970. Т. 15, № 2. С. 257–262.

89. *Амстиславский А.З., Копылов А.И., Просмушкин М.И.* Конструкция отражающих элементов и облучателя радиотелескопа РАТАН-600 // Изв. ГАО АН СССР. 1972. № 188. С. 89–96.

90. *Ангельский А.Н., Голубчин Г.С., Постоев Ю.К. и др.* Система автоматизированного управления западного сектора отражателя радиотелескопа РАТАН-600 // *Астрофиз. исслед.* 1982. С. 88–105. (Изв. САО АН СССР; № 155).

91. *Шиврис О.Н.* Работа радиотелескопа РАТАН-600 с плоским отражением // Там же. 1980. С. 134–140. (Изв. САО АН СССР; № 12).

92. *Гиндилис Л.М., Есепкина Н.А., Карашев Н.С.* О работе антенны переменного профиля с плоским перископическим отражателем // Изв. ГАО АН СССР. 1972. № 188. С. 54–57.

93. *Белевитин А.Г., Зверев Ю.К.* Гео-

дезические работы при строительстве и юстировке радиотелескопа РАТАН-600 // Там же. С. 114–119.

94. Стоцкий А.А., Калихевич Г.Н., Осина Т.Н. и др. Автоколлимационная юстировка и исследование стабильности радиотелескопа РАТАН-600 // *Астрофиз.* 1987. С. 143–167. (Изв. САО АН СССР; № 25).

95. Пинчук Г.А., Стоцкий А.А. Применение радиоголографии для исследования радиотелескопа РАТАН-600 // Там же. 1982. С. 135–145. (Изв. САО АН СССР; № 16).

96. Гельфрейх Г.Б. Радиоастрономический способ юстировки антенн переменного профиля // *Изв. ГАО АН СССР.* 1972. № 188. С. 139–148.

97. Гольнев В.Я., Корольков Д.В., Фридман П.А. Адаптивный радиометр с пилот-сигналом // *Астрофиз. исслед.* 1981. С. 52–61. (Изв. САО АН СССР; № 13).

98. Хайкин С.Э., Парийский Ю.Н. Эффект насыщения и большие радиотелескопы // *Изв. ГАО АН СССР.* 1964. Т. 23, вып. 3, № 172. С. 87–103.

99. Илясов Ю.П. К вопросу о влиянии эффекта "путаницы" на чувствительность больших радиотелескопов при наблюдении дискретных источников // *Изв. вузов. Радиофизика.* 1971. Т. 14, № 4. С. 536–545.

100. Брук Ю.М., Содин Л.Г. Расчет основных параметров фазированной антенно-решетки при дискретно-позитивном несинхронном управлении положением луча // *Радиотехника.* 1966. Т. 21, № 7. С. 16–25.

101. Брук Ю.М. О структуре и свойствах фазированной решетки с минимальным числом переключающих элементов // Там же. 1973. Т. 28, № 3. С. 46–80.

102. Базелян Л.Л., Брук Ю.М., Жук И.Н. и др. Широкополосный радиоинтерферометр с электрическим управлением диаграммой направленности // *Изв. вузов. Радиофизика.* 1964. Т. 7, № 2. С. 215–224.

103. Брук Ю.М., Гончаров Н.Ю., Мень А.В. и др. Т-образный радиотелескоп УТР-1 диапазона 10–25 МГц с электрическим управлением лучом // Там же. 1967. Т. 10, № 5. С. 608–619.

104. Брук Ю.М., Гончаров Н.Ю., Жук И.Н. и др. Экспериментальные исследования многоэлементных антенно-решеток радиотелескопа УТР-1 // Там же. 1968. Т. 11, № 1. С. 28–43.

105. Брауде С.Я., Мень А.В. Радиотелескоп УТР-2 и задачи декаметрового радиоастрономии: Тез. докл. Науч. сессии Отд-ния общей физики и атмосферы, 25–26. 10.1972 г. // *УФН.* 1973. Т. 109, № 4. С. 769–771.

106. Брауде С.Я., Мень А.В., Содин Л.Г. Радиотелескоп декаметрового диапазона волн УТР-2 // *Антенны / Под ред. А.А. Пистолькорса.* М.: Связь, 1978. Вып. 26. С. 3–15.

107. Мень А.В., Содин Л.Г., Шарыкин Н.К. и др. Принципы построения и характеристики антенн радиотелескопа УТР-2 // Там же. С. 15–57.

108. Мень А.В., Мельяновский П.А. О согласовании излучателей с системой фазирования в широкополосных антенных решетках радиотелескопа УТР-2 // Там же. С. 58–75.

109. Мень А.В., Бовкун В.П. Помехоустойчивые широкополосные антенные усилители // Там же. С. 75–91.

110. Брук Ю.М., Инютин Г.А. Широкополосные суммирующие и согласующие устройства антенно-решеток // Там же. С. 91–107.

111. Брук Ю.М., Инютин Г.А. Двоично-дискретные линии задержки (фазовращатели) для широкополосных электрически управляемых антенн // Там же. С. 107–121.

112. Мень А.В., Антонов А.В. Исследование влияния ионосферы на характеристики радиотелескопа УТР-2 // *Изв. вузов. Радиофизика.* 1973. Т. 16, № 9. С. 1434–1438.

113. Мельяновский П.А., Мень А.В. Методы контроля параметров фазированной антенно-решетки // *Электросвязь.* 1971. № 10. С. 66–71.

114. Содин Л.Г. К теории оптимальных антенн // *РЭ.* 1967. Т. 12, № 12. С. 2108–2117.

115. Бобейко А.Л., Бовкун В.П., Брауде С.Я. и др. Интерферометр декаметрового диапазона радиоволн УРАН-1 // *Антенны / Под ред. А.А. Пистолькорса.* М.: Связь, 1978. Вып. 26. С. 121–134.

116. Бовкун В.П., Мень А.В. Интерферометрические наблюдения на декаметровых волнах // *Изв. вузов. Радиофизика.* 1983. Т. 26, № 11. С. 1357–1370.

117. Виткевич В.В. Крупный центр радиоастрономии // *Вестн. АН СССР.* 1961. Т. 5. С. 23–32.

118. Алексеев Ю.И. Система управления линией "Восток–Запад" крестообразного радиотелескопа ДКР-1000 //

Диапазонный крестообразный радиотелескоп. М.: Наука, 1967. С. 3–9. (Тр. ФИАН; Т. 38).

119. Илясов Ю.П. Основные параметры облучателя антенны "Восток–Запад" диапазонного крестообразного радиотелескопа ФИАН // Радиоастрономические инструменты и наблюдения. М.: Наука, 1969. С. 173–182. (Тр. ФИАН; Т. 47).

120. Давыдов В.В., Добыш Г.И., Илясов Ю.П. и др. Многоканальная корреляционная система для радиотелескопа ДКР-1000 // Радиоастрономические инструменты и исследования. М.: Наука, 1985. С. 65–75. (Тр. ФИАН; Т. 159).

121. Алексеев И.А., Гуднова В.В., Носов А.И. и др. Некоторые особенности и результаты разработки комплекса распределенного усиления ДКР-1000 ФИАН // VIII Всесоюз. конф. по радиоастрономии: Тез. докл. Пуцкино: ОНТИ НЦБИ, 1975. С. 89–91.

122. Илясов Ю.П., Солодков В.Т., Володин Ю.В. Диапазонная система сканирования антенны "Восток–Запад" ДКР-1000 // Радиоастрономические инструменты и исследования. М.: Наука, 1985. С. 57–65. (Тр. ФИАН; Т. 159).

123. Илясов Ю.П., Иванов С.Н. Электрическое управление лучом в диапазонной антенной решетке с зонированными фазовращателями при изменении частоты // Диапазонный крестообразный радиотелескоп. М.: Наука, 1967. С. 15–28. (Тр. ФИАН; Т. 38).

124. Иванов С.Н., Илясов Ю.П., Солодков В.Т. и др. Модернизация систем управления диаграммой направленности антенны север–юг ДКР-1000 // Антенны / Под ред. А.А. Пистолькорса. М.: Связь, 1979. Вып. 27. С. 38–45.

125. Добыш Г.И., Илясов Ю.П., Извеков Б.К. и др. Радиointерферометр на частоте 85,5 МГц с ретрансляцией // Изв. вузов. Радиофизика. 1973. Т. 16, № 12. С. 1853–1856.

126. Ершов А.А., Илясов Ю.П., Лехт Е.Е. и др. Низкочастотные линии возбужденного углерода в направлении Кассиопея А. Наблюдения на частотах 42, 57 и 84 МГц // Письма в "Астрон. журн.". 1984. Т. 10, № 11. С. 838–845.

127. Гельфрейх Г.Б., Корольков Д.В., Смольков Г.Я. и др. К вопросу о создании радиогелиографа с высокой разрешающей способностью // Результаты наблюдений и исследований в период МГСС. Сибирь и Дальний Восток. М.: Наука, 1967. Вып. 4. С. 168–179.

128. Смольков Г.Я. Крестообразная система апертурного синтеза // Изв. вузов. Радиофизика. 1983. Т. 24, № 11. С. 1403–1418.

129. Смольков Г.Я., Тресков Т.А., Криссинель Б.Б. и др. Основные проектные параметры Сибирского солнечного радиотелескопа // Исследование по геомагнетизму, аэронавигации и физике Солнца. М.: Наука, 1983. Вып. 64. С. 130–148.

130. Смольков Г.Я., Тресков Т.А., Пистолькорс А.А. Ввод в действие Сибирского солнечного радиотелескопа и результаты первых наблюдений // УФН. 1985. Т. 147, вып. 3. С. 621–624.

131. Смольков Г.Я. Сибирский солнечный радиотелескоп // Наука и человечество. М.: Знание, 1986. С. 315–318.

132. Криссинель Б.Б. Структура системы автоматического фазирования трактов многоэлементного радиointерферометра // Исследования по геомагнетизму, аэронавигации и физике Солнца. М.: Наука, 1977. Вып. 42. С. 169–174.

133. Белош В.В., Путилов В.А., Смольков Г.Я. Комплекс автоматизации Сибирского солнечного радиотелескопа // Там же. 1983. Вып. 64. С. 157–168.

134. Игнатьев М.Б., Путилов В.А., Смольков Г.Я. Модели и системы управления комплексными экспериментальными исследованиями. М.: Наука, 1986. 232 с.

135. Пистолькорс А.А., Шмулевский В.Н. О прохождении Солнца через лепестки диаграммы направленности ССРТ // Исследования по геомагнетизму, аэронавигации и физике Солнца. М.: Наука, 1973. Вып. 26. С. 156–168.

136. Кременецкий С.Д., Путилов В.А., Рисоввер Л.М. и др. Методы построения и обработки радиоизображений Солнца / Под ред. А.А. Пистолькорса. М.: Наука, 1983. 128 с.

137. Smolkov G.Ya., Stepanov V.E., Grigor'ev V.M. et al. The last Siberia complex of SIBIZMIR. Solar observations // Astrophys. and Space Sci. 1986. Vol. 118. P. 21–30.

138. Виткевич В.В., Илясов Ю.П. Вопросы создания крупных радиотелескопов в свете новых задач радиоастрономии (пульсары, мерцания). М., 1964. С. 1–14. (Препр. / ФИАН СССР; № 14).

139. Виткевич В.В., Глушаев А.А., Илясов Ю.П. и др. Антенно-аппаратурный комплекс БСА ФИАН // Изв. вузов.

Радиофизика. 1976. Т. 19, № 11. С. 1594–1606.

140. Хьюиш А., Белл С., Пилкингтон Дж. и др. Наблюдения быстропульсирующего радиосточника // Пульсары / Пер. с англ. под ред. В.В. Виткевича. М.: Мир, 1971. С. 27–40.

141. Алексеев И.А., Добыш Г.И. Новая система распределенного усиления антенны БСА ФИАН // XIV Всесоюз. конф. по радиоастрономии: Тез. докл. Ереван: Изд-во АН АрмССР, 1982. С. 220.

142. Илясов Ю.П., Солодков В.Т. Система управления антенной БСА ФИАН от ЭВМ-6000 // Там же. С. 315–316.

Глава 2

1. Догель В.А., Илясов Ю.П., Кайдановский Н.Л. и др. Радиоастрономические исследования в ФИАН // Очерки истории радиоастрономии в СССР. Киев: Наук. думка, 1985. С. 9–78.

2. Виткевич В.В. Интерференционный метод в радиоастрономии // Астрон. журн. 1952. Т. 29, № 4. С. 450.

3. Саломонович А.Е., Кузьмин А.Д. Радиоастрономические методы измерений параметров антенн. М.: Сов. радио, 1964. 184 с.

4. Виткевич В.В. Новый метод исследования солнечной короны // ДАН СССР. 1951. Т. 77. С. 585–589.

5. Виткевич В.В., Кузьмин А.Д., Матвеев Л.И. и др. Радиоастрономические наблюдения советских космических ракет // РЭ. 1961. № 9. С. 1420–1431.

6. Матвеев Л.И. Результаты наблюдений радиопятен на Солнце // Известия вузов. Радиофизика. 1963. Т. 6, № 4. С. 660–668.

7. Матвеев Л.И., Мисежников Г.С., Мухина М.М. и др. Применение квантового парамагнитного усилителя бегущей волны для радиоастрономических исследований на волне 8 см // ДАН СССР. 1965. Т. 161, № 4. С. 810–812.

8. Матвеев Л.И. Радиоастрономия // Астрономия. М.: ВИНТИ, 1977. Т. 13. 117 с. (Итоги науки и техники).

9. Heeschen D.S. The very large array // Sky and Telescope. 1975. Vol. 49, N 6. P. 344.

10. Davies J.G., Anderson B., Morison I. The Jodrell Bank radio-linked interferometer network // Nature. 1980. N 288. P. 64–66.

11. Матвеев Л.И., Кардашев Н.С., Шоломицкий Г.Б. О радиointерферометре с большой базой // Изв. вузов. Радиофизика. 1965. Т. 8, № 4. С. 651–654.

12. Handury Brown R., Twiss R.Q. A new type interferometer for use in radio astronomy // Philos. Mag. 1954. Vol. 45. P. 663–682.

13. Матвеев Л.И. Исследования тонкой структуры радиосточников // Астрофизика и космическая физика / Под ред. Р.А. Сюняева. М.: Наука, 1982. С. 88–117.

14. Баррет А.Х., Кутуза Б.Г., Матвеев Л.И. и др. Наблюдения источников радионизлучения на волнах 3,3 см и 0,8 см // Астрон. журн. 1965. Т. 42, № 3. С. 527–530.

15. Шоломицкий Г.Б., Курильчик В.И., Матвеев Л.И. и др. Три источника радионизлучения с пеккулярными спектрами // Астрон. циркуляр. 1964. № 283. С. 2–3.

16. Bare C., Clark B.G., Kellermann K.I. et al. Interferometer experiment with independent local oscillators // Science. 1967. Vol. 157, N 3785. P. 189–191.

17. Lovell B. Out of the zenith Jodrell Bank 1955–1970. L.: Oxford Univ., 1973. P. 47.

18. Broten N.W., Legg T.H., Locke J.L. et al. A long base line interferometry: A new technique // Science. 1967. Vol. 156, N 3782. P. 48–49.

19. Kellermann K.I., Jauncey D.L., Cohen M.H. et al. High-resolution observations of compact radio sources at 6 and 18 cm // Astrophys. J. 1971. Vol. 169, N 1. P. 1–24.

20. Бродерик Д.Д., Виткевич В.В., Джонси Д.Д. и др. Наблюдения компактных радиосточников на радиointерферометре с базой Грин-Бэнк–Крым // Астрон. журн. 1970. Т. 47, № 4. С. 784–786.

21. Кайдановский Н.Л., Смирнова Н.А. Ограничение разрешающей силы радиотелескопов и радиointерферометров за счет условий распространения радиоволн в космической среде и атмосфере Земли // РЭ. 1965. Т. 10, № 9. С. 1574–1582.

22. Алексеев В.А., Антонен М.А., Антонян Ю.А. и др. Интерференционный коррелометр на основе ЭВМ "Раздан-3" // Изв. АН СССР. Сер. техн. наук. 1972. Т. 25, № 4. С. 3–9.

23. Алексеев В.А., Антонен М.А., Вит-

кевич В.В. и др. Радиointерферометр независимого приема на 86 МГц // Изв. вузов. Радиотехника. 1971. Т. 14, № 3. С. 1303–1314.

24. Алексеев В.А., Антонен М.А., Виняйкин Е.Н. и др. Измерение угловых размеров радиоисточника Кассиопея А на частоте 9 МГц радиointерферометром независимого приема на базах 1,5 и 7 км // Там же. 1973. Т. 16, № 9. С. 1307–1313.

25. Брауде С.Я., Мень А.В., Рашковский С.Л. и др. Аппаратурный комплекс системы РСДБ декаметрового диапазона волн УРАН // Тез. докл. XVII Всесоюз. радиоастрономической конф. Ереван, 1985. С. 58–60.

26. Алексеев В.А., Антонен М.А., Белов И.Ф. и др. Измерения угловых размеров дискретных радиоисточников интерферометром независимого приема на 408 МГц с разрешением 0,1 угл. сек. // Изв. вузов. Радиофизика. 1973. Т. 16, № 9. С. 1314–1317.

27. Кларк Б., Бродерик Д.Д., Ефанов В.А. и др. Наблюдения компактных объектов космического радиоизлучения на волне 3,55 см с предельным угловым разрешением // Астрон. журн. 1972. Т. 49. № 4. С. 700–703.

28. Clark B.G. The NRAO tape-recorder interferometer system // IEEE. 1973. Vol. 61, N 9. P. 1242–1248.

29. Clark B.G., Kellermann K.J., Cohen M.H. et al. Variation in the radio structure of BL Lacertae // Astrophys. J. 1973. Vol. 182, N 2. P. L57.

30. Kellermann K.J., Pauliny-Toth I.I.K. Compact radio sources // Annu. Rev. Astron. and Astrophys. 1981. Vol. 19. P. 373–410.

31. Knowles S.H., Mayer C.H., Cheund A.C. et al. Spectra, variability size and polarization of H₂O microwave emission source in the Galaxy // Science. 1969. Vol. 163. N 3871. P. 1055.

32. Берк Б.Ф., Джонстон К.Д., Ефанов В.А. и др. Наблюдения источников мазерного радиоизлучения с угловым разрешением 0,0002 // Астрон. журн. 1972. Т. 49. № 3. С. 465–469.

33. Аблязов В.С., Алексеев В.А., Антонен М.А. и др. Наблюдения источников H₂O на радиointерферометре со сверхдлинной базой Пушино–Симеиз // Изв. вузов. 1974. Т. 17, № 10. С. 1431–1437.

34. Коган Л.Р., Матвеевко Л.И. Система регистрации радиointерферометра со сверхдлинной базой. М., 1974. (Препр. ИКИ АН СССР; № 207).

35. Коган Л.Р., Копелянский Г.Д., Костенко В.И. и др. Радиометры для сверхдлинной радиointерферометрии. М., 1976. 11 с. (Препр./ИКИ АН СССР; № 224).

36. Матвеевко Л.И. Яркий мазерный источник H₂O в Орионе // Письма в "Астрон. журн." 1981. Т. 7, № 2. С. 100–105.

37. Паулини-Тос И.И.К., Пройс Е., Витцел А. и др. Наблюдения компактных радиоисточников на волне 1,35 см с высоким угловым разрешением // Там же. Т. 4, № 2. С. 64–69.

38. Матвеевко Л.И., Костенко В.И., Папаценко А.Х. и др. Радиointерференционные наблюдения компактных радиоисточников на волне 18 см // Там же. 1981. Т. 7, № 8. С. 470–478.

39. Padrielli L. Two epoch VLBI observations of a sample of low frequency variable sources // Astron. and Astrophys. 1986. Vol. 165, N 1/2. P. 53–73.

40. Тимофеев В.В., Костенко В.И., Матвеевко Л.И. Система регистрации и вычислительный комплекс ИКИ АН СССР // Тез. докл. XVII Всесоюз. радиоастрономической конф. Ереван, 1985. С. 76–77.

41. Матвеевко Л.И., Сагдеев Р.З., Балебанов В.М. и др. Сверхдлинная радиointерференционная сеть на волне 18 см // Письма в "Астрон. журн." 1986. Т. 12, № 1. С. 59–65.

42. Moffet A.T., Readhead A.C.S. Observations of 3C 273 at 3 mm wavelength // Superluminal radio sources: Proc. of Workshop. Cambridge (Cal.): Univ. press, 1986. P. 32–33.

43. Коттон В.Д., Вителлс Д.Д. Восстановление изображения, исходя из амплитуд и замкнутых фаз РСДБ экспериментов // Построение изображений в астрономии по функциям когерентности. М.: Мир, 1982. С. 98.

44. Матвеевко Л.И. Ограничение углового разрешения радиointерферометра со сверхдлинной базой. М., 1979. (Препр./ИКИ АН СССР; № 479).

45. Матвеевко Л.И., Паулини-Тос И.И.К., Шервуд Б. и др. Исследования структуры квазара 3C 345 на дециметровых волнах // Письма в "Астрон. журн.". 1986. Т. 12, № 2. С. 156–168.

46. Матвеевко Л.И., Келлерман К.И., Паулини-Тос И.И.К. и др. Структура ядра сейфертовской галактики NGC 1275 // Там же. 1980. Т. 6, № 2. С. 77–86.

47. Матвеевко Л.И. Видимые сверх-

световые скорости разлета компонент во внегалактических объектах // УФН. 1983. Т. 140, № 3. С. 463–501.

48. Джуфрида Т.С., Гринфилд П.Е., Берк Б.Ф. и др. Структура мазерного источника H_2O в объекте W 3 OH // Письма в "Астрон. журн." 1981. Т. 7, № 6. С. 358–365.

49. Genzel R., Downes D., Moran J.M. et al. H_2O in W 51 main: An expanding bubble around a young massive star? // Astron. and Astrophys. 1979. Vol. 78, N 1, P. 239–247.

50. Genzel R., Reid M.J., Moran J.M. et al. Propagations and distances of H_2O maser sources I: The outflow in Orion KL // Astrophys. J. 1981. Vol. 244, N 3. P. 884–902.

51. Матвеев Л.И. Вспышка мазерного излучения H_2O // Астрон. журн. 1986. Т. 63, № 5. С. 996–1000.

52. Костенко В.И., Матвеев Л.И. Прецизионная антенна космического радиотелескопа // Космич. исслед., 1982. Т. 20, № 1. С. 149–151.

53. Дравских А.Ф., Стоцкий А.А., Финкельштейн А.М. и др. Тропосферные ограничения на точность фазовых измерений координат в астрономии // Изв. ГАО АН СССР. 1978. Т. 10. С. 108–119.

54. Matveyenko L.I. Limitation of the VLBI angular resolution // Proc. of a Workshop. Austria: Gross Enzersdorf, 1984. P. 119–121.

55. Yen Y.L., Kellermann K.I., Rayner B. et al. Real-time VLBI based on the use of the communications satellite // Science. 1977. Vol. 198, N 4314. P. 289–291.

56. Levi J.S., Linfield R.P., Ulvestad J.S. et al. VLBI observations made with an orbiting radio telescope // Ibid. 1987. Vol. 234. P. 187–189.

57. Sagdeev R.Z. Some prospects of space VLBI // Proc. of a Workshop. Austria: Gross Enzersdorf, 1984. P. 19–21.

58. Kardashev N.S., Slysh V.I. Project Radioastron // Proc. of a Workshop. Cambridge, 1987. (IAU symp.; N 129).

59. Schilizzi R.T., Burke B.F., Jordan J.F. et al. The Quasat mission: an overview // Proc. of a Workshop. Austria: Gross Enzersdorf, 1984. P. 13–18.

60. Кардашев Н.С., Парийский Ю.Н., Умарбаева Н.Д. Возможность прямых измерений расстояний во Вселенной радиометодами и трехмерная радиоастрономия // Астрофиз. исслед. 1973. С. 16–29. (Изв. САО; Т. 5).

Глава 3

1. Троицкий В.С., Алексеев В.А., Никонов В.Н. Новые возможности решения задач астрометрии, геодинамики и геодезии методами радиointерферометрии со сверхдлинной базой // УФН. 1975. Т. 117, № 2. С. 363–368.

2. Троицкий В.С. Радиоастрономический метод измерения расстояний между континентами и сверх часов // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 1970. Т. 13, № 1. С. 112–120.

3. Алексеев В.А. Исследование вопросов радиointерферометрии высокого углового разрешения: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Горький, 1970. 13 с.

4. Алексеев В.А., Гатзлюк Э.Д., Липатов Б.Н. и др. Синхронизация шкал времени в пунктах РСДБ по наблюдениям лазерных источников космического радиоизлучения // Изв. вузов. Радиофизика. 1975. Т. 18, № 12. С. 1777–1785.

5. Коган Л.Р., Костенко В.И., Матвеев Л.И. Возможности применения радиointерферометрического комплекса ИКИ в геодезии и астрометрии // Наблюдения искусственных небесных тел. 1976. № 5. С. 171.

6. Жаров В.Е., Коган Л.Р., Федосеев Е.Н. Астрометрические результаты, полученные на радиointерферометре Крым–Пушино. М., 1981. 24 с. (Препр. / ИКИ АН СССР; № 687).

7. Дубинский Б.А. Анализ точности измерения базы интерферометра // Изв. вузов. Радиофизика. 1973. Т. 16, № 12. С. 1857.

8. Алексеев В.А., Липатов Б.Н., Щекотов Б.В. Радиоастрометрия с применением дифференциальных интерферометрических измерений на сверхдлинных базах // Изв. вузов. Радиофизика. 1976. Т. 19, № 11. С. 1669–1677.

9. Алексеев В.А. Об оптимальной программе интерферометрических наблюдений на сверхдлинных базах для построения инерциальной системы координат // Астрометрические исследования: Материалы 21-й астрометр. конф. СССР, Ташкент, 1978. Киев: Наук. думка, 1978. С. 75–78.

10. Дравских А.Ф., Красинский Г.А., Финкельштейн А.М. Радиоастрономическая инерциальная система координат, основанная на измерениях дуг между радиоисточниками // Письма в "Астрон. журн." 1975. Т. 1, № 5. С. 43–48.

11. Губанов В.С., Финкельштейн А.М., Фридман П.А. Введение в радиоастрометрию. М.: Наука, 1983. 279 с.

12. Фонголович И.Д., Валеев В.И., Малков А.А., Сабанина Т.Б. Использование радиоинтерферометра со сверхдлинной базой при решении ряда основных проблем астрономии, геодезии и геодинамики // Тр. ИТА АН СССР. 1977. Вып. 16. С. 19–58.

13. Алексеев В.А., Антипенко А.А., Гаталюк Э.Д. и др. Радиоастрометрический интерферометр НИРФИ. Горький, 1986. 53 с. (Препр. / НИРФИ; № 206).

14. Алексеев В.А., Антипенко А.А., Гаталюк Э.Д. и др. Астрометрические астрофизические исследования на РСДБ НИРФИ // Радиотелескопы и интерферометры: Тез. докл. XVIII Всесоюз. конф. по радиоастрономии. Иркутск, 1986. С. 117–118.

15. Алексеев В.А., Алтунин В.И., Бирюков А.В. и др. РСДБ-эксперимент по радиопросвечиванию околосолнечной плазмы сигналами АМС "Венера-15" // Письма в "Астрон. журн." 1986. Т. 12, № 6. С. 486–492.

16. Алексеев В.А., Алтунин В.И., Антипенко А.А. и др. Исследования комы кометы Галлея методом длиннобазовой интерферометрии с использованием радиосигналов пролетных аппаратов "Вега" // Радиотелескопы и интерферометры: Тез. докл. XVIII Всесоюз. конф. по радиоастрономии. Иркутск, 1986. С. 225–226.

17. Алексеев В.А., Липатов Б.Н., Никонов В.Н., Троицкий В.С. Изменение угловых координат ИСЗ и азэростата методом сверхдальной радиоинтерферометрии // Докл. симпозиум по советско-французскому проекту "Венера-ЭОС". М.: ИКИ АН СССР, 1974. С. 10–14.

18. Сагдеев Р.З., Матвеев Л.И., Линкин В.М. и др. Аэростатный эксперимент, проект ВЕГА: Наземный комплекс // Письма в "Астрон. журн." 1986. Т. 12, № 1. С. 16–19.

Глава 4

1. Хайкин С.Э., Чихачев Б.М. Исследование радиоизлучения Солнца Бразильской экспедицией АН СССР по наблюдениям солнечного затмения 20.V.1947 г. // ДАН СССР. 1947. Т. 58, № 9. С. 1923–1926.

2. Гинзбург В.Л. Об излучении Солнца в области радиочастот // Там же. 1946. Т. 52, № 6. С. 491–494.

3. Шкловский И.С. Об изучении радиоволн Галактики и верхними слоями атмосферы Солнца // Астрон. журн. 1946. Т. 23, № 6. С. 333–347.

4. Троицкий В.С., Виленская М.Р., Рахлин В.Л., Бобрик В.Т. Результаты наблюдений радиоизлучения Солнца на волнах 3,2 см и 10 см во время полных солнечных затмений 25 февраля 1952 г. и 30 июня 1954 г. // Тр. 5-го совещ. по вопросам космогонии. М.: Изд-во АН СССР, 1956. С. 182–196.

5. Молчанов А.П., Гюннинен Э.М., Мельников А.В. и др. Результаты наблюдений солнечных затмений 1952 и 1954 гг. на волне 3,2 см // Там же. С. 197–199.

6. Виткевич В.В., Чихачев Б.М. Наблюдение радиоизлучения Солнца на волнах метрового диапазона во время полного солнечного затмения 25 февраля 1959 г. // Там же. С. 174–178.

7. Моисеев И.Г. Наблюдения радиоизлучения Солнца во время солнечного затмения 30 июня 1954 года // Изв. КРАО. 1958. Т. 18. С. 196–197.

8. Санамян В.А., Ерзникаян Г.А. // Докл. АН АрмССР. 1955. Т. 20. С. 161.

9. Саломонович А.Е., Парийский Ю.Н., Хангильдин У.В. Наблюдение полного солнечного затмения 30 июня 1954 г. в миллиметровом диапазоне волн // Астрон. журн. 1958. Т. 35. С. 659–661.

10. Кайдановский Н.Л., Мирзабекян Э.Г., Хайкин С.Э. Поляризационный радиометр на длину волны 3,2 см и его применения // Тр. 5-го совещ. по вопросам космогонии. М.: Изд-во АН СССР, 1956. С. 113–122.

11. Корольков Д.В., Соболева Н.С. Наблюдение поляризации радиоизлучения Солнца во время солнечного затмения 2 декабря 1956 г. // Солнечные данные. 1957. № 1. С. 149–151.

12. Молчанов А.П., Чень-фан-юнь, Ван Шоу-гуань и др. Предварительные результаты наблюдений кольцеобразного затмения Солнца 19 апреля 1958 г. // Радиоастрономия: Парижский симпозиум, 1958. М., 1961. С. 172–173.

13. Молчанов А.П., Чень-фан-юнь. Результаты наблюдения солнечного затмения 19 апреля 1958 г. // КЭСЮЭ Тунбао, 1958. № 11. С. 336–340.

14. Ду Лен Яо, Малахов А.Н., Плечков В.М. и др. Наблюдения кольцеобразного затмения Солнца 19 апреля 1958 г. на волнах 1,63, 3,2 и 10 см // Изв. вузов. Радиофизика. 1959. Т. 11, № 2. С. 155–158.

15. *Корольков Д.В., Соболева Н.С.* Результаты обработки поляризационных наблюдений солнечного затмения 19 апреля 1958 г. в сантиметровом диапазоне волн // *Астрон. журн.* 1961. Т. 38, № 4. С. 647–651.

16. *Корольков Д.В., Парийский Ю.Н., Соболева Н.С.* К вопросу об измерении магнитных полей и других физических характеристик в областях над пятнами из радионаблюдений // *Солнечные данные.* 1958. № 9. С. 65–69.

17. *Молчанов А.П.* Спектр локальных источников радиоизлучения Солнца // *Астрон. журн.* 1961. Т. 38, № 5. С. 849–854.

18. *Железняков В.В.* О частном спектре медленно меняющейся компоненты солнечного радиоизлучения // Там же. 1963. Т. 40, № 5. С. 829–841.

19. *Троицкий В.С.* Измерения сигналов, имеющих сплошной спектр: Дис. ... канд. физ.-мат. наук / ГИФТИ, Горький, 1949. 17 с.

20. *Молчанов А.П.* Излучение радиоволн сантиметрового диапазона: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Л., ЛГУ. 1950. 200 с.

21. *Виткевич В.В.* О радиоизлучении спокойного и слабо возмущенного Солнца // *Тр. 5-го совещ. по вопросам космогонии.* М., 1956. С. 149–172.

22. *Зелинская М.Р., Троицкий В.С.* Методика абсолютных измерений радиоаппаратуры Солнца и Луны на сантиметровых волнах и результаты, полученные на волне 3,2 // Там же. С. 99–105.

23. *Кротиков В.Л., Порфирьев В.А., Троицкий В.С.* Разработка метода прецизионного измерения интенсивности поля и эталонирование радиоизлучения Луны на $\lambda = 3,2$ см // *Изв. вузов. Радиофизика.* 1961. Т. 4, № 6. С. 1004–1012.

24. Развитие радиоастрономии в СССР / Под ред. А.Е. Соломоновича. М.: Наука, 1983. 222 с.

25. *Молчанов А.П.* Метод измерения потоков радиоизлучения Луны и Солнца // *Изв. вузов. Радиофизика.* 1960. Т. 3, № 4. С. 722–723.

26. *Кузьмин А.Д.* Вопросы измерения интенсивности радиоизлучения космических источников // *Тр. 5-го совещ. по вопросам космогонии.* М., 1956. С. 106–112.

27. Очерки истории радиоастрономии в СССР: Сб. науч. тр. Киев: Наук. думка, 1985. 280 с.

28. *Виткевич В.В.* Наблюдение рассеяния радиоволн на электронных не-

однородностях солнечной короны // *Тр. 5-го совещ. по вопросам космогонии.* М., 1956. С. 203–223.

29. *Дравских А.Ф.* Спектральные особенности всплесков радиоизлучения Солнца в сантиметровом диапазоне волн // *Изв. ГАО.* 1960. Т. 21, вып. 5, № 164. С. 128–139.

30. *Чихачев Б.М.* Исследование локальных источников радиоизлучения на Солнце: Дис. ... канд. физ.-мат. наук / М.: ФИАН. 1950. 215 с.

31. *Санамян В.А.* Радиотелескоп Бюроканской обсерватории // *Сообщ. БАО.* 1954. Вып. 12. С. 3–10.

32. *Виткевич В.В.* Новый метод исследования солнечной короны // *ДАН СССР.* 1951. Т. 77, № 4. С. 585–588.

33. *Хайкин С.Э., Кайдановский Н.Л.* Новый радиотелескоп с высокой разрешающей способностью // *Радиоастрономия: Парижский симпозиум.* 1958. М., 1961. С. 165–168.

34. *Виткевич В.В., Кузьмин А.Д., Соломонович А.Е.* и др. Радиоизображение Солнца на волне 3,2 см // Там же. С. 129–135.

35. *Соломонович А.Е.* Радиотелескоп с 22-метровым рефлектором // *РЭ.* 1959. № 12. С. 2092–2093.

36. *Молчанов А.П.* Определение положения области быстрого изменения характеристик солнечной атмосферы по результатам радиоастрономических наблюдений // *ДАН СССР.* 1964. Т. 159, № 2. С. 302–304.

37. *Боровик В.Н.* Распределение яркости по диску спокойного Солнца в диапазоне 2–4 см по наблюдениям на РАТАН-600 // *Письма в "Астрон. журн."* 1980. Т. 6, № 7. С. 426–431.

38. *Молчанов А.П.* Наблюдения затмений Солнца в диапазоне радиоволн 3,2–3,4 см // *Радиоизлучение Солнца.* Л.: Изд-во ЛГУ, 1974. Вып. 3. С. 3–15.

39. *Гельфейх Г.Б., Корольков Д.В., Тимофеева Г.М.* Результаты наблюдений полного солнечного затмения 30 мая 1965 г. с помощью радиоинтерферометра с малой базой на волне 0,4 см // *Изв. ГАО.* 1968. Т. 1, № 184. С. 85–98.

40. *Яснов Л.В.* Вопросы, связанные с анализом записи прохождения через диаграмму направленности космического источника при линейном сканировании // *Радиоизлучение Солнца.* Л.: Изд-во ЛГУ, 1969. Вып. 1. С. 69–76.

41. *Молчанов А.П.* О взаимном соответствии результатов радиоастрономических и оптических наблюдений хро-

мосферы // Солнечные данные. 1960. № 11. С. 64–66.

42. Боровик В.Н. Радиоизлучение спокойного Солнца на волне 3,2 см и его связь с фазой цикла солнечной активности // Изв. САО. 1979. Т. 11. С. 107.

43. Lantos P., Furst E., Hirth W. The variation of solar brightness at the extreme solar limb at centimetre radio waves // Solar Physics. 1979. Vol. 63, N 2. P. 271–274.

44. Kundu M.R., Rao A.P., Erskine F.T., Bregman J.D. High-resolution observations of the quiet Sun at 6 centimeters using the Westerbork synthesis radio telescope // Astrophys. J. 1979. Vol. 234, N 3, Pt 1. P. 1122–1136.

45. Пановкин Б.Н. Модель внутренней короны по радиоданным // Астрон. журн. 1957. Т. 34. С. 505–514.

46. Кисляков А.Г., Куликов Ю.Ю., Федосеев Л.И. и др. Наблюдения Солнца на волнах 1,4 и 4,1 мм с угловым разрешением 13 и 40 // Письма в "Астрон. журн." 1975. Т. 1, № 4. С. 24–28.

47. Кисляков А.Г., Кузнецов И.В., Кузнецова Н.А. и др. Экваториальное распределение яркости по диску "спокойного" Солнца на волне 4,08 мм // Астрон. журн. 1974. Т. 51, № 5. С. 1036–1043.

48. Бабий А.Н., Гопасюк С.И., Ефанов В.А. и др. Усиление магнитных полей, радиояркости в миллиметровом диапазоне волн и H_{α} -активность в полярных областях // Изв. КРАО. 1976. Т. 55. С. 3–13.

49. Авдюшин С.И., Борисова Е.Л., Зайцев Е.И. и др. Особенности строения корональных магнитных полей перед вспышками по наблюдениям на радиотелескопе ТИА-1500 // XVI Всесоюз. конф. по радиоастрономическим исследованиям солнечной системы: Тез. докл. М.: ИЗМИРАН, 1984. С. 25–26.

50. Кисляков А.Г. Предварительные результаты экспериментального исследования радиоизлучения Солнца в диапазоне 3–7 мм // Изв. вузов. Радиофизика. 1961. Т. 4, № 4. С. 760–762.

51. Гребинский А.С., Седов А.Б. О микроволновом излучении солнечных вспышек // Астрон. журн. 1982. Т. 59, № 2. С. 365–371.

52. Саломонович А.Е. Радиоизлучение Солнца на волне 8 мм // Астрон. журн. 1960. Т. 37. С. 969–971.

53. Федосеев Л.И., Лубяко Л.В., Кукин Л.М. Радиоизлучение Луны в мил-

лиметровом и субмиллиметровом диапазонах мод // Там же. 1967. Т. 44. С. 1191–1193.

54. Ефанов В.А., Моисеев И.Г. Наблюдения радиоизлучения Солнца на волнах 3,13 и 16 мм // Изв. КРАО. 1971. Т. 43. С. 21–25.

55. Молчанов А.П., Пудов О.Я., Франчук Н.Г. Определение спектрального индекса радиоизлучения невозмущенного Солнца в диапазоне волн 2,97–3,30 мм // Радиоизлучение Солнца. Л.: Изд-во ЛГУ. 1973. Вып. 2. С. 34–44.

56. Абрамян Э.П., Базелян Л.Л., Быстров М.В. и др. Обнаружение квазипериодических компонентов с периодами 2–6 мин в радиоизлучении короны спокойного Солнца на волнах 12–15 м // Радиоастрономические исследования солнечной системы: Тез. докл. X Всесоюз. конф. Иркутск, 1977. С. 22–23.

57. Ефанов В.А., Моисеев И.Г., Северный А.Б. Прохождение Меркурия по диску Солнца 9 мая 1970 г. и колебания радиоизлучения на волне 8 мм // Изв. КРАО. 1975. Т. 53. С. 121–129.

58. Кисляков А.Г., Куликов Ю.Ю., Федосеев Л.И. и др. Наблюдения Солнца на волнах 1,4 и 4,1 мм с угловым разрешением 13 и 40' // Письма в "Астрон. журн." 1975. Т. 1, № 4. С. 24–28.

59. Богод В.М., Корольков Д.В. Обнаружение "хромосферной сетки" по Солнцу в сантиметровом диапазоне волн // Там же. № 10. С. 25–27.

60. Gelfreikh G.B., Bogod V.M., Korzhavin A.N. et al. Solar radio granulation at microwaves and its optical identification // Sun and planetary systems // Ed. W. Fricke, G. Teleki. 1982. P. 109–112.

61. Гельфрейх Г.Б., Кайдановский М.Н., Кононович Э.В. и др. Оптическое отождествление радиогрануляции на волне 1,35 см с деталями хромосферной сетки // Письма в "Астрон. журн." 1977. Т. 3, № 12. С. 550–553.

62. Юдин О.И. Квазипериодические низкочастотные флуктуации радиоизлучения Солнца // ДАН СССР. 1968. Т. 14. С. 821–823.

63. Morita K.-I. A search for 5-min oscillation in total microwave flux of the Sun observed at Toyokawa // Proc. Res. Inst. Atmos. Nagoya Univ. 1979. Vol. 26.

64. Дурасова М.С., Кобрин М.М., Лосовский Б.Я. и др. Наблюдения квазипериодических компонентов в радиоизлучении Солнца на волне 8 мм // Астрон. циркуляр. 1969, № 531. С. 1–3.

65. Берулис И.И., Франчук Н.Г., Яс-

нов Л.В. Наблюдения флуктуации радиоизлучения Солнца на радиотелескопе с высокой угловой разрешающей способностью: Препр. / ФИАН СССР. М., 1979. 20 с.

66. Берулис И.И., Молчанов А.П., Олянюк В.П. и др. Спектральный индекс и флуктуация радиоизлучения Солнца на волне $\lambda = 3$ см // Изв. вузов. Радиофизика. 1973. Т. 16, № 9. С. 1362–1365.

67. Butz M., Hirth W., Fürst E. The fluctuations of flux from limited solar areas at radio frequencies and propagation of waves in the coronal plasma // Astron. and Astrophys. 1979. Vol. 72, N 1/2. P. 211–214.

68. Боровик В.Н., Лившиц М.А. Изменение радиорадуса Солнца с появлением на лимбе корональной дыры // Астрон. журн. 1982. Т. 59, № 2. С. 355–364.

69. Стрельнева К.М., Плечков В.М., Стародубцев А.М. Исследование корреляции интенсивности солнечного радиоизлучения с видимыми активными образованиями на Солнце // Солнечные данные. 1958. № 7. С. 69–75. (Бюл. ГАО АН СССР).

70. Кайдановский Н.Л., Корольков Д.В., Соболева Н.С. и др. Наблюдения поляризованного радиоизлучения солнечных пятен на волне 3 см // Там же. 1956. № 4. С. 143–148.

71. Weldmeier M., Müller H. // Ztschr. Aph. 1950. Bd. 27, Heft 1. S. 58–72.

72. Ихсанова В.Н. Наблюдения радиоизлучений Солнца с большим пучковым радиотелескопом при различных азимутах на волнах 3,15 и 8,7 см // Изв. ГАО. 1964. № 172. С. 31–32.

73. Корольков Д.В., Соболева Н.С., Гельфрейх Г.Б. Исследование локальных областей радиоизлучения Солнца по поляризационным наблюдениям в см диапазоне волн // Там же. 1960. Т. 2, № 164. С. 81–82.

74. Железняков В.В. О происхождении медленно меняющейся компоненты солнечного радиоизлучения // Астрон. журн. 1962. Т. 39, № 1. С. 5–14.

75. Железняков В.В. О частотном спектре медленно меняющейся компоненты солнечного радиоизлучения // Там же. 1963. Т. 40. С. 829–833.

76. Гельфрейх Г.Б., Лубышев Б.И. О структуре локальных источников S-компоненты радиоизлучения Солнца // Там же. 1979. Т. 56, № 3. С. 562–573.

77. Гельфрейх Г.Б., Лубышев Б.И. Автоподстраивающаяся модель ядра локального источника S-компоненты ра-

диоизлучения Солнца: Препр. СибИЗМИР 21-83. Иркутск, 1983. 34 с.

78. Злотник Е.Я. К теории медленно меняющейся компоненты солнечного излучения // Астрон. журн. 1968. Т. 45, № 3. С. 585–596.

79. Корольков Д.В., Соболева Н.С. Результаты обработки поляризационных наблюдений солнечного затмения 19 апреля 1958 г. в сантиметровом диапазоне волн // Там же. 1961. Т. 38, № 4. С. 647–651.

80. Гельфрейх Г.Б., Ахмедов Ш.Б., Боровик В.Н. и др. Исследование локальных источников медленно меняющейся компоненты радиоизлучения Солнца в см диапазоне // Изв. ГАО. 1970. Т. 3, № 185. С. 167–182.

81. Ахмедов Ш.Б. О взаимности потока медленно меняющейся компоненты радиоизлучения Солнца от класса групп пятен // Солнечные данные. 1962. № 2. С. 76–83. (Бюл. ГАО АН СССР).

82. Петерова Н.Г. Исследование поляризации и других свойств локальных источников S-компоненты радиоизлучения Солнца в диапазоне 4,5 см с высоким разрешением: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Л.: ГАО АН СССР, 1974. 125 с.

83. Ахмедов Ш.Б. Статистическое исследование характеристик медленно меняющейся компоненты радиоизлучения Солнца на волне 9 см // Изв. вузов. Радиофизика. 1973. Т. 16, № 9. С. 1388–1394.

84. Nagnibeds V.A. // Structure and development of solar active regions. Budapest, 1968. P. 565.

85. Саломонович А.Е. Радиоизлучение Солнца на волне 8 мм // Астрон. журн. 1962. Т. 39, № 2. С. 266–270.

86. Кисляков А.Г., Саломонович А.Е. Радиоизлучение активных областей Солнца в мм диапазоне волн // Там же. 1963. Т. 40, № 2. С. 229–233.

87. Апушкинский Г.П., Цыганов А.Н. Локальные источники радиоизлучения на Солнце в миллиметровом диапазоне волн // Солнечные данные. 1967. № 10. С. 81–82. (Бюл. ГАО АН СССР).

88. Ефанов В.А., Моисеев И.Г. Метод наблюдения всплесков радиоизлучения Солнца остронаправленными антеннами // Изв. КрАО. 1968. Т. 38. С. 149–154.

89. Ефанов В.А., Куликов Ю.Ю., Моисеев И.Г. и др. Наблюдения солнечных активных областей на волнах 1,35; 1,76 и 8 мм // Там же. 1973. Т. 48. С. 93–97.

90. Ефанов В.А., Моисеев И.Г. О поляризованном по кругу излучении над би-

полярной группой пятен на волне 8 мм // Там же. Т. 47. С. 58–63.

91. Моисеев И.Г. О поляризованном по кругу излучении над биполярными группами пятен на волне 1,35 см // Там же. 1977. Т. 56. С. 100–105.

92. Домнин С.Л., Ефанов В.А., Корсенский В.А. и др. Структура локального источника на Солнце по наблюдениям затмения при помощи РТ-22 КрАО АН СССР в интегральном и циркулярно-поляризованном излучении на волне 1,35 см // Там же. Т. 58. С. 144–148.

93. Гребинский А.С., Манько В.И., Яснов Л.В. Радиоизлучение источников на Солнце, связанных с пятнами и флоккулами на $\lambda = 1,6$ см // Астрон. журн. 1968. Т. 45, № 3. С. 597–600.

94. Молчанов А.П., Олянюк В.П., Франчук П.Г. Наблюдения радиоизлучения активных областей Солнца в диапазоне волн 2,97 – 3,3 см // Радиоизлучение Солнца. Л.: Изд-во ЛГУ, 1973. Вып. 2. С. 3–34.

95. Гельфрейх Г.Б., Госачинский И.В., Парийский Ю.Н. Предполагаемые астрофизические задачи для радиотелескопа РАТАН-600 // Изв. ГАО. 1972. № 188. С. 188–189.

96. Богод В.М., Болдырев С.И., Чпачева И.А. и др. Комплекс радиополяриметров сантиметрового диапазона для радиотелескопа РАТАН-600 // Солнечные данные. Л.: Наука, 1976. № 11. С. 93–100.

97. Гельфрейх Г.Б. О возможности измерения слабых магнитных полей Солнца по радиоастрономическим наблюдениям // Астрон. циркуляр. 1972. № 699. С. 3–5.

98. Bogod V.M., Gelfreikh G.B. Measurements of the magnetic field and the gradient of temperature in the solar atmosphere above a flocculus using radio observations // Solar Phys. 1980. Vol. 67, N 1. P. 29–46.

99. Сковороцв П.И., Фридман В.М. О величинах магнитного поля во флоккулах, определенных по радионаблюдениям Солнца 7 марта 1970 г. // Астрон. циркуляр. 1974. № 828. С. 4–6.

100. Гельфрейх Г.Б., Снегирев С.Д., Фридман В.М. и др. Исследование магнитных полей солнечного флоккула по радиоастрономическим наблюдениям // Изв. вузов. Радиофизика. 1975. Т. 18, № 12. С. 1764–1769.

101. Гребинский А.С. Об измерении магнитных полей во флоккулах по поляризации солнечного радиоизлучения // Астрон. журн. 1985. Т. 62, № 4. С. 768–775.

102. Белов И.Ф., Кобрин М.М., Коршунов А.И. и др. О методе измерения наклона спектра радиоизлучения Солнца и его использовании при наблюдении затмения 22 сентября 1968 г. в г. Горьком // Солнечные данные. 1969. № 11. С. 95–101. (Бюл. ГАО АН СССР).

103. Белов И.Ф., Ваулина Л.А., Дивакова Е.К. Об измерении частотного спектра радиоизлучения Солнца в диапазоне 6200–7100 МГц // Изв. вузов. Радиофизика. 1973. Т. 16, № 5. С. 723–727.

104. Каверин Н.С., Коршунов А.И., Шушнов В.В. О некоторых особенностях в спектрах радиоизлучения локальных источников в диапазоне 8–12 ГГц // 13-я Всесоюз. конф. по радиоастроном. исслед. солнечной системы: Тез. докл. Киев, 1981. С. 21.

105. Дравских А.Ф. и др. О тонкой структуре спектра S-компоненты радиоизлучения Солнца в диапазоне 9350 – 10350 МГц // Солнечные данные. 1977. № 7. С. 77–79.

106. Авдошин С.И., Зайцев Е.И., Макогонов С.В. и др. Динамические и спектральные характеристики радиоизлучения локальных источников на Солнце в диапазоне $\lambda = 7,5 \div 9$ см по наблюдениям на радиотелескопе ТНА-1500 // Солнечная активность. Алма-Ата: Наука, 1983. С. 86–96.

107. Железняков В.В., Злотник Е.Я. О влиянии нейтральных токовых слоев в космической плазме на частотный спектр проходящего радиоизлучения // Астрон. журн. 1980. Т. 57, № 5. С. 1038–1046.

108. Zheleznyakov V.V., Zlotnik E. Ya. Thermal cyclotron radioemission of neutral current sheets in the solar corona // Solar Phys. 1980. Vol. 68. P. 317–326.

109. Syrovatskii S.I. // Solar-terrestrial physics / Ed. E.R. Dyer. Dordrecht: D.Reidel, 1970. P. 119–133.

110. Хангильдин У.В. Характеристики активных областей Солнца по наблюдениям в миллиметровом диапазоне волн // Астрон. журн. 1964. Т. 41, № 2. С. 302–312.

111. Богод В.М., Гельфрейх Г.Б. Наблюдение активного протуберанца в сантиметровом диапазоне на РАТАН-600 // Письма в "Астрон. журн." 1978. Т. 4, № 10. С. 463–466.

112. Коробчук О.В., Петерова Н.Г. Спектральные исследования протонно-активных областей на Солнце в см диапазоне волн // Радиоизлучение Солнца. Л.: Изд-во ЛГУ, 1984. Вып. 5. С. 102–113.

113. *Погодин И.Е.* К объяснению некоторых особенностей вспышечной активности Солнца в 11-летних циклах // ДАН СССР. 1977. Т. 234, № 6. С. 1284–1287.

114. *Белов И.Ф., Кобрин М.М., Коршунов А.И.* и др. О корреляции квазипериодических компонентов флуктуаций солнечного радиоизлучения на частотах 9100 – 9300 МГц // Астрон. циркуляр. 1969. № 531. С. 3–4.

115. *Кобрин М.М.* и др. Разработка радиоастрономических методов прогнозирования солнечной активности на основе измерений спектра радиоизлучения Солнца в диапазоне сантиметровых волн: Отчет о НИР/НИРФИ. Горький, 1978. 274 с. Рег. № 76014807 ВИНТИ.

116. *Кобрин М.М., Белов И.Ф.* Исследования флуктуаций солнечного радиоизлучения: Отчет о НИР/НИРФИ. Горький, 1975. 160 с. Рег. № 74006219 ВИНТИ.

117. *Ахмедов Ш.Б.* Свойства локальных источников солнечного радиоизлучения на волне 9,0 см и вспышечная активность групп пятен // Солнечные данные. 1970. № 10. С. 109–116.

118. *Занданов В.Г., Тресков Т.А.* Применение интерферометра для измерений флуктуации радиоизлучения Солнца // Исследования по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца. М.: Наука, 1973. Вып. 26. С. 187–196.

119. *Берлин А.Б., Гельфрейх Г.Б., Занданов В.Г.* и др. Предварительные результаты исследования спектра флуктуации радиоизлучения Солнца с почти непрерывным перекрытием суточного интервала // Изв. вузов. Радиофизика. 1973. Т. 16. С. 1366–1369.

120. *Занданов В.Г., Уралов А.М.* Колесания микроволнового излучения Солнца как отклик на крупномасштабное возмущение // XIII Всесоюз. конф. по радиоастрономическим исследованиям солнечной системы: Тез. докл. Киев: Наук. думка, 1981. С. 38–39.

121. *Гельфрейх Г.Б., Леденев В.Г., Нефедьев В.П.* Флуктуации поляризованного радиоизлучения Солнца на волне 3,2 см // Исследования по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца. М.: Наука, 1975. Вып. 37. С. 19–23.

122. *Ершов Н.Н., Котов В.А., Северный А.Б.* и др. Наблюдения пульсаций радиоизлучения Солнца с периодом 160 мин в диапазоне 1,9 – 3,5 см // Письма в "Астрон. журн." 1979. Т. 5, № 10. С. 546–551.

123. *Аверьянихина Е.А., Озолиньш Г.А., Паупере М.Э.* и др. О квазипериодических компонентах флуктуаций радиоизлучения Солнца на частоте $\nu = 755$ МГц в июне–сентябре 1979 г. // Астрон. циркуляр. 1981. № 1185. С. 2–4.

124. *Гельфрейх Г.Б., Деревянко О.Г., Коржавин А.Н.* и др. Периодические флуктуации потоков локальных источников радиоизлучения Солнца // Солнечные данные. 1969. № 9. С. 88–89.

125. *Снегирев С.Д.* О квазипериодических флуктуациях радиоизлучения Солнца с периодами от 45 до 90 мин в дециметровом диапазоне волн // Изв. вузов. Радиофизика. 1979. Т. 22, № 1. С. 5–11.

126. *Абрамян Э.П., Базелян Л.Л., Быстров М.В.* и др. Квазипериодические флуктуации радиоизлучения Солнца в дециметровом диапазоне длин волн // Письма в "Астрон. журн." 1978. Т. 4, № 12. С. 559–561.

127. *Снегирев С.Д.* Об изучении возмущений в солнечной короне путем анализа флуктуаций радиоизлучения на 3 и 30 см // XIII Всесоюз. конф. по радиоастрономическим исследованиям Солнечной системы: Тез. докл. Киев.: Наук. думка, 1981. С. 34.

128. *Кобрин М.М., Снегирев С.Д.* О возмущениях короны, вызывающих пульсации радиоизлучения "спокойного" Солнца в диапазоне 20 – 25 МГц // Там же. С. 34–35.

129. *Авдошин С.И., Зайцев Е.И., Макоганов С.В.* и др. Динамические и спектральные характеристики радиоизлучения локальных источников на Солнце в диапазоне $\lambda = 7,5 \div 9$ см по наблюдениям на радиотелескопе ТНА-1500 // Солнечная активность. Алма-Ата: Наука, 1983. С. 86–96.

130. *Берулин И.И., Молчанов А.П., Оляник В.П.* и др. Наблюдения радиоизлучения Солнца в августе 1972 г. // Радиоизлучение Солнца. Л.: Изд-во ЛГУ, 1974. Вып. 3. С. 16–44.

131. *Кобрин М.М., Коршунов А.И., Снегирев С.Д.* и др. О резком возрастании квазипериодических компонентов флуктуаций наклона спектра радиоизлучения Солнца на волне $\lambda = 3$ см в период, предшествующий активным событиям августа 1972 г. // Солнечные данные. Л.: Наука, 1973. № 10. С. 79–86.

132. *Быстров М.В., Кобрин М.М., Снегирев С.Д.* Квазипериодические пульсации магнитного поля Земли с периодами 20 – 200 мин и их связь с аналогичными

пульсациями в радиоизлучении Солнца перед протонными вспышками // Геомагнетизм и аэрономия. 1979. Т. 19, № 2. С. 306–310.

133. Кобрин М.М., Малыгин В.И., Снегирев С.Д. Пульсации радиоизлучения Солнца перед протонными вспышками и свидетельство наличия аналогичных пульсаций в ионизирующем излучении, проявляющемся во флуктуациях магнитного поля Земли // XIII Всесоюз. конф. по радиоастрономическим исследованиям Солнечной системы: Тез. докл. Киев: Наук. думка, 1981. С. 32–33.

134. Арбузов С.И. Вариации наклона спектра радиоизлучения активных областей на Солнце ($\lambda = 3$ см) во время солнечных вспышек // Изв. вузов. Радиофизика. 1979. Т. 22, № 10. С. 1165–1176.

135. Кобрин М.М., Снегирев С.Д., Фридман В.М. О связи изменений потока и наклона спектра радиоизлучения Солнца на $\lambda = 3$ см со всплесками мягкого рентгеновского излучения // Письма в "Астрон. журн." 1978. Т. 4, № 6. С. 286–288.

136. Шкловский И.С. Об излучении радиоволн Галактикой и верхними слоями атмосферы Солнца // Астрон. журн. 1946. Т. 43. С. 333–347.

137. Гинзбург В.Л. Об излучении Солнца в области радиочастот. // ДАН СССР. 1946. Т. 52. С. 491–494.

138. Гинзбург В.Л., Железняков В.В. О возможных механизмах спорадического радиоизлучения Солнца // Астрон. журн. 1958. Т. 35. С. 694–700.

139. Железняков В.В. Радиоизлучение Солнца и планет. М.: Наука, 1964. 560 с.

140. Zheleznyakov V.V., Tikhonov Yu.V. Microwave emission from hot X-ray kernels in solar flares // Solar Phys. 1982. Vol. 81. P. 121–135.

141. Гребинский А.С., Седов А.П. О микроволновом излучении солнечных вспышек // Астрон. журн. 1982. Т. 59. С. 365–371.

142. Гребинский А.С., Седов А.П. Оценка магнитных полей в областях генерации микроволновых радиовсплесков на Солнце // Прогнозирование солнечных вспышек и их последствий. Л.: Изд-во ЛГУ, 1984. С. 120–128.

143. Ковалев В.А., Королев О.С. К вопросу об интерпретации спектров солнечных микроволновых всплесков // Астрон. журн. 1976. Т. 53. С. 130–139.

144. Zaitsev V.V., Stepanov A.V. The plasma radiation of flare kernels // Solar Phys. 1983. Vol. 88. P. 297–313.

145. Зайцев В.В., Степанов А.В., Стерлин А.М. Пульсации микроволнового излучения солнечных вспышек: МГД и плазменные модели // Письма в "Астрон. журн." 1985. Т. 11. С. 463–468.

146. Somov B.V., Syrovatskii S.J., Spector A.R. Hydrodynamic response of the solar chromosphere to an elementary flare burst // Solar Phys. 1981. Vol. 73, N 1. P. 145–155.

147. Ковалев В.А. О тепловом радиоизлучении солнечной вспышки во время импульсного прогрева // Письма в "Астрон. журн." 1981. Т. 7. С. 696–700.

148. Уралов А.М., Нефедьев В.П. К природе солнечных микроволновых всплесков с квазитепловым спектром // Астрон. журн. 1976. Т. 53. С. 1041–1045.

149. Уралов А.М., Нефедьев В.П. Некоторые поляризационные особенности микроволновых всплесков на Солнце // Там же. 1977. Т. 54. С. 1319–1324.

150. Каплан С.А., Цытович В.Н. Радиоизлучение пучков быстрых частиц в космических условиях // Там же. 1967. Т. 44. С. 1194–1205.

151. Каплан С.А., Пикельнер С.Б., Цытович В.Н. Физика плазмы солнечной атмосферы. М.: Наука, 1977. 256 с.

152. Каплан С.А., Цытович В.Н. Плазменная астрофизика. М.: Наука, 1972. 440 с.

153. Каплан С.А. Элементарная радиоастрономия. М.: Наука, 1966. 278 с.

154. Железняков В.В., Зайцев В.В. К теории всплесков солнечного радиоизлучения III типа // Астрон. журн. 1970. Т. 47, № 1. С. 60–74; 1970. Т. 47, № 2. С. 308–321.

155. Зайцев В.В. К вопросу о стабилизации пучковой неустойчивости // Изв. вузов. Радиофизика. 1970. Т. 13, № 6. С. 837–843.

156. Zaitsev V.V., Mityakov N.A., Rapoport V.O. A dynamic theory of type III solar radio bursts // Solar Phys. 1972. Vol. 24. P. 444–456.

157. Зайцев В.В. К теории солнечных радиовсплесков II и III типов // Изв. вузов. Радиофизика. 1977. Т. 20, № 9. С. 1379–1398.

158. Еремин А.Б., Зайцев В.В. О стратификации электронных пучков, генерирующих солнечные радиовсплески III типа // Письма в "Астрон. журн." 1982. Т. 8, № 8. С. 495–499.

159. Eremin A.B., Zaitsev V.V. On the origin of type III fundamental // Solar Phys. 1985. Vol. 102. P. 99–110.

160. Левин Б.Н. К вопросу о форми-

ровании диффузионной компоненты солнечных электронных потоков // Астрон. журн. 1982, Т. 59, № 1. С. 99–107.

161. *Levin B.N.* A quasi-one-dimensional velocity regime of superthermal electron stream propagation through the solar corona // *Solar Phys.* 1984. Vol. 92. P. 317–328.

162. *Пикельнер С.Б., Гинцбург М.А.* О механизме всплесков II типа радиоизлучения Солнца // Астрон. журн. 1963. Т. 90, № 5. С. 842–846.

163. *Зайцев В.В.* К теории всплесков II типа радиоизлучения Солнца // Астрон. журн. 1965. Т. 42. С. 740–748.

164. *Зайцев В.В.* О параметрах ударных волн, генерирующих солнечные радиовсплески II типа, и магнитных полях в короне // Там же. 1968. Т. 45. С. 766–772.

165. *Зайцев В.В., Степанов А.В.* О происхождении электронных потоков, генерирующих "елочную" структуру всплесков II типа // Изв. вузов. Радиофизика. 1974. Т. 17. С. 1229–1232.

166. *Степанов А.В.* Об интенсивности радиоизлучения из фронта бесстолкновительной ударной волны // Там же. 1970. Т. 13. С. 1342–1349.

167. *Фомичев В.В., Черток И.М.* О поляризации солнечных радиовсплесков II и III типа // Астрон. журн. 1969. Т. 45. С. 28–35.

168. *Фомичев В.В.* О распространении в солнечной короне ударных волн, вызывающих радиовсплески II типа // Там же. 1972. Т. 49. С. 348–354.

169. *Zaitsev V.V., Parfenov O.G., Stepanov A.V.* The structure of the turbulent shock wave propagating in the solar atmosphere across the magnetic field // *Solar Phys.* 1980. Vol. 60. P. 279–291.

170. *Уайди Дж., Смерд С.* Радиовсплески в солнечной короне // УФН. 1974. Т. 113. С. 503–533.

171. *Зайцев В.В., Леденев В.Г.* Генерация быстрых электронов в ударных волнах, распространяющихся вдоль магнитного поля. // Письма в "Астрон. журн." 1976. Т. 2. С. 443–447.

172. *Леденев В.Г.* О радиоизлучении Солнца II типа // Астрон. журн. 1979. Т. 56. С. 84–88.

173. *Леденев В.Г.* Электромагнитное излучение из фронта МГД ударной волны // Письма в "Астрон. журн." 1977. Т. 3. С. 273–277.

174. *Фомичев В.В., Черток И.М.* Тонкая структура солнечных радиовсплесков на метровых волнах (обзор) //

Изв. вузов. Радиофизика. 1977. Т. 20. С. 1255–1301.

175. *Степанов А.В.* О механизме генерации солнечных радиовсплесков IV типа. // Астрон. журн. 1973. Т. 50. С. 1243–1253.

176. *Леденев В.Г.* К теории всплесков радиоизлучения Солнца IV типа // Там же. 1982. Т. 59. С. 742–750.

177. *Леденев В.Г.* Стационарный режим конусной неустойчивости плазменных волн // Изв. вузов. Радиофизика. 1984. Т. 27. С. 873–879.

178. *Zaitsev V.V., Stepanov A.V.* On the origin of fast-drift absorption bursts // *Astron. and Astrophys.* 1975. Vol. 40. P. 135–140.

179. *Zheleznyakov V.V., Zlotnik E.Ya.* Cyclotron wave instability in the corona and origin of solar radio emission with fine structure // *Solar Phys.* 1975. Vol. 43. P. 431–451; Vol. 44. P. 447–460, 461–470.

180. *Злотник Е.Я.* Об интерпретации поляризованной зebra-структуры в солнечном радиоизлучении // Астрон. журн. 1977. Т. 54. С. 1309–1312.

181. *Железняков В.В.* Электромагнитные волны в космической плазме. М.: Наука, 1977. 432 с.

182. *Железняков В.В., Зайцев В.В.* О происхождении солнечных радиовсплесков V типа // Астрон. журн. 1968. Т. 45. С. 1927.

183. *Маркеев А.К., Фомичев В.В., Чернов Г.П.* и др. Поляризационная структура шумовых бурь // Там же. 1975. Т. 52. С. 989–992.

184. *Маркеев А.К., Фомичев В.В., Черток И.М.* Пульсации солнечного метрового континуального радиоизлучения // Там же. С. 338–345.

185. *Зайцев В.В., Фомичев В.В.* О происхождении цепочек всплесков I типа // Там же. 1972. Т. 49. С. 817–826.

186. *Трахтенгерц В.Ю.* К теории солнечных радиовсплесков I типа // Там же. 1966. Т. 43. С. 356–361.

187. *Королев О.С., Петвиашвили В.И.* Солитоны и механизмы всплесков I типа на Солнце // Физика плазмы. 1975. Т. 1. С. 436–442.

188. *Гельфрейх Г.Б.* Тепловая модель всплеска в сантиметровом диапазоне // Солнечные данные. 1962. № 5. С. 67–75.

189. *Саломонович Д.Е.* Локализация всплесков радиоизлучения Солнца на волне 8 мм // ДАН СССР. 1960. Т. 37. С. 969–972.

190. *Дравских А.Ф.* Спектральные осо-

бенности всплесков радиоизлучения Солнца в сантиметровом диапазоне волн // Изв. ГАО. 1960. Т. 21. С. 128–139.

191. *Нефедьев В.П., Трескова Л.Е.* Поляризация всплесков солнечного радиоизлучения на волне 3,2 см и ее связь с магнитным полем на уровне фотосферы // Солнечные данные. 1969. № 7. С. 107.

192. *Нефедьев В.П., Турчина В.Д.* Всплески радиоизлучения Солнца со сменной знака поляризации на волне 3,2 см // Исследования по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца. М.: Наука, 1970. Вып. 6. С. 87–89.

193. *Нефедьев В.П.* Характер поляризации всплесков радиоизлучения на волне 3,2 см и структура хромосферных вспышек // Там же. 1973. Вып. 26. С. 143–150.

194. *Нефедьев В.П.* Пространственно-временная связь импульсных хромосферных вспышек и всплесков радиоизлучения Солнца в сантиметровом диапазоне волн // Письма в "Астрон. журн." 1978. Т. 4, № 9. С. 411–414.

195. *Зубкова Г.Н., Нефедьев В.П.* О причинах, влияющих на знак круговой поляризации радиоизлучения всплесков на волне 3,2 см // Солнечные данные. 1980. № 4. С. 95–99. (Бюл. ГАО АН СССР).

196. *Nefed'ev V.P.* Variation of circular and linear polarization in bursts emission as a consequence of dynamic processes in the solar atmosphere // *Publs Debrecen heliophys. observ.* 1983. Vol. 5. P. 443–449.

197. *Нефедьев В.П.* О возможности оценки физических условий в области токового слоя во время развития хромосферной вспышки // Письма в "Астрон. журн." 1979. Т. 5, № 2. С. 96–99.

198. *Кардаполова Н.Н., Нефедьев В.П., Смольков Г.Я.* Всплесковая активность 23 июня 1984 г. // Астрон. циркуляр. 1985. № 1413. С. 6–7.

199. *Королев О.С., Маркеев А.К., Фомичев В.В., Черток И.М.* О ключковатой структуре солнечных радиовсплесков II типа // Астрон. журн. 1973. Т. 50. С. 1233–1242.

200. *Маркеев А.К., Фомичев В.В., Черток И.М.* Солнечный радиовсплеск II типа с обратным частотным дрейфом // Астрон. журн. 1976. Т. 53. С. 1254–1258.

201. *Chernov C.P., Chertok I.M., Fomichev V.V., Markeev A.K.* Results of observations of spectra and polarization of meter solar radio emission with high time resolution, May–June, 1969 // *Solar Phys.* 1972. Vol. 24. P. 215–232.

202. *Чернов Г.П.* О микроструктуре в континуальном излучении метровых всплесков IV типа // Астрон. журн. 1976. Т. 53. С. 798–811; 1027–1040.

203. *Моисеев И.Г., Гонясюк С.И.* О сопоставлении спорадического радиоизлучения Солнца на волне 1,5 м с оптическими процессами на Солнце // Изв. КрАО. 1957. Т. 17. С. 211–218.

204. *Моисеев И.Г.* Оценка электронной плотности в короне по наблюдениям радиоизлучения Солнца // Астрон. журн. 1961. Т. 38. № 3. С. 541–543.

205. *Bazelyan L.L., Goncharov N.Yu., Zaitsev V.V.* et al. Collisionless deceleration of fast electron streams in the solar coronal plasma // *Solar Phys.* 1977. Vol. 52. P. 141–149.

206. *Bazelyan L.L., Goncharov N.Yu., Zaitsev V.V.* et al. Frequency and time splitting of decimeter solar radio bursts // *Ibid.* 1974. Vol. 39. P. 213–222; 223–231.

207. *Абрамкин Э.П., Базелян Л.Л., Гончаров Н.Ю.* и др. Некоторые результаты наблюдений "дрейфующих пар" вблизи частот 25 и 12,5 МГц // Астрон. журн. 1977. Т. 54. С. 146–153.

208. *Abramkin E.P., Bazelyan L.L., Goncharov N.Yu.* et al. Harmonic structure of type IIIb and III bursts // *Solar Phys.* 1979. Vol. 62. P. 145–151.

209. *Зайцев В.В., Зиничев В.А.* Солнечные радиовсплески типа "вилки" // Изв. вузов. Радиофизика. 1974. Т. 27. С. 5–10.

210. *Мельников В.Ф., Нефедьев В.П., Подстригач Т.С.* и др. Всплески радиоизлучения 13 и 16 мая 1981 г. и сопутствующие им явления в распределении радиояркости над активным комплексом // *Publs Debrecen heliophys. observ.* 1983. Vol. 5. P. 161–176.

211. *Кацаров Г.Е., Матвеев Г.А., Мельников В.Ф.* и др. Корреляция рентгеновского и микроволнового радиоизлучения солнечных вспышек по наблюдениям в марте–апреле 1979 г. // Радиоизлучение Солнца. Л.: Изд-во ЛГУ, 1984. Вып. 5. С. 45–59.

212. *Гельфрейх Г.Б., Коржавин А.Н., Киненес Х.* и др. Служба радиоизлучения Солнца на волне 4,5 см на Гаванской радиоастрономической станции // Солнечные данные. 1974. № 9. С. 80–87.

213. *Syrovatskii S.I.* Pinch sheets and reconnection in astrophysics // *Ann. Rev. Astron. and Astrophys.* 1981. Vol. 19. P. 163–229.

214. *Zheleznyakov V.V., Zlotnik E.Ya.* Thermal cyclotron radiation from solar

active region // Radio physics of the Sun / Ed. M.Kundu, T.Gergely. Dordrecht: D.Reidel, 1980. P. 87–99.

215. Zheleznyakov V.V., Zlotnik E.Ya. Thermal cyclotron radio emission of neutral current sheets in the solar corona // Solar Phys. 1980. Vol. 68. P. 317–326.

216. Сыроватский С.И. О возможности наблюдения предвысших тоновых слоев на Солнце // Письма в "Астрон. журн." 1977. Т. 3. С. 133–136.

217. Syrovatskii S.I., Kuznetsov V.A. On the possibility of radio observation of current sheets // Radio physics of the Sun / Ed. M.Kundu, T.Gergely. Dordrecht: D.Reidel, 1980. P. 445–455.

218. Кузнецов В.А., Сыроватский С.И. Критерий прогнозирования солнечных вспышек в радиодиапазоне // XI Ленинград, семинар по космофизике, Л., 1979. С. 72–77.

219. Зайцев В.В., Степанов А.В. Происхождении пульсаций жесткого рентгеновского излучения солнечных вспышек // Письма в "Астрон. журн." 1982. Т. 8 С. 248–252.

220. Зайцев В.В., Степанов В.А. О природе пульсаций рентгеновского и микроволнового излучения солнечных вспышек // Проблемы физики солнечных вспышек. М.: ИЗМИРАН, 1983. С. 173–186.

221. Zaitsev V.V., Stepanov A.V. Physics of solar flare diagnostics // Solar maximum analysis / Ed. V.E. Stepanov, V.N. Obridko. VNU Sci. Press. 1986.

222. Акиньян С.Т., Фомичев В.В., Черток И.М. Определение параметров солнечных протонов в окрестности Земли по радиовсплескам // Геомагнетизм и аэронавтика. 1977. Т. 17. С. 10–15; 177–183.

223. Акиньян С.Т., Фомичев В.В., Черток И.М. Заблаговременное определение параметров потоков протонов от солнечных вспышек по данным о радиовсплесках // Космич.биология и авиакосмич. медицина. 1983. № 3. С. 69–72.

224. Черток И.М. Оценки показателя энергетического спектра протонов по данным о солнечных микроволновых радиовсплесках // Геомагнетизм и аэронавтика. 1982. Т. 22. С. 182–186.

225. Акиньян С.Т., Фомичев В.В., Черток И.М. Результаты количественной диагностики протонных вспышек по данным о радиовсплесках за контрольный интервал 1970–1977 гг. // Там же. 1980. Т. 20. С. 385–396.

226. Фомичев В.В., Черток И.М. Соотношение между гамма-излучением, радиовсплесками и потоками протонов от

солнечных вспышек // Астрон. журн. 1985. Т. 62. С. 956–964.

227. Zaitsev V.V., Stepanov A.V., Chernov G.P. Pulsations of type IV radio bursts as an indicator of protonability of solar flares // Solar Phys. 1984. Vol. 93. P. 363–377.

228. Meerson B.I., Sazorov P.V., Stepanov A.V. Pulsations of type IV solar radio bursts: The bounce-resonance effects // Ibid. 1987. Vol. 58. P. 165–179.

229. Розенпраух Ю.М., Степанов А.В. О модуляции плазменного радиоизлучения корональных апок // Contr. Astron. Observatory Scalnate Pleso. 1986. Vol. 15. P. 409–413.

230. Молчанов А.П., Погодин И.Е. Прогнозирование последствий солнечных вспышек // Радиоизлучение Солнца. Л.: Изд-во ЛГУ, 1978. Вып. 4. С. 3–29.

231. Авдюшин С.И., Барабанищев Ю.Ф., Молчанов А.П. и др. Оперативное прогнозирование радиационных последствий солнечных вспышек по их радиоизлучению // Солнечные данные. 1982. № 7. С. 100–107. (Бюл. ГАО АН СССР).

232. Авдюшин С.И., Барабанищев Ю.Ф., Молчанов А.П. и др. Прогнозирование радиационных последствий солнечных вспышек по сопутствующему радиоизлучению: состояние и перспективы // Радиоизлучение Солнца. Л.: Изд-во ЛГУ, 1984. Вып. 5. С. 5–44.

233. Радиоизлучение Солнца: Межвуз. сб./Под ред. А.П. Молчанова. Л.: Изд-во ЛГУ, 1984. Вып. 5. 212 с.

234. Погодин И.Е. Некоторые особенности статистических распределений всплесков радиоизлучения Солнца // Астрон. журн. 1982. Т. 59, № 2. С. 376–380.

235. Алексеев В.В., Левашова Т.В., Молчанов А.П. и др. О радиоизлучении вспышек на Солнце и свойствах корональных магнитных полей // Радиоизлучение Солнца. Л.: Изд-во ЛГУ, 1984. Вып. 5. С. 78–101.

236. Беловский М.Н., Очелков Ю.П. О некоторых особенностях генерации электромагнитного и корпускулярного излучения солнечных вспышек // Астрон. журн. 1980. Т. 57. С. 119–126.

Глава 5

1. Виткевич В.В. Новый метод исследования солнечной короны // ДАН СССР. 1951. Т. 77, № 4. С. 34–37.

2. Виткевич В.В. Результаты наблюдений распространения радиоволн через

солнечную корону // Астрон. журн. 1955. Т. 32, № 2. С. 106–120.

3. Виткевич В.В. Солнечная сверхкорона и ее влияние на принимаемое радиоизлучение Солнца // Там же. 1956. Т. 33, № 1. С. 62–73.

4. Виткевич В.В., Пановкин Б.Н. К вопросу о структуре неоднородностей сверхкороны Солнца // Там же. 1959. Т. 36, № 3. С. 544–546.

5. Виткевич В.В. Структура неоднородностей и регулярное магнитное поле сверхкороны Солнца // Изв. вузов. Радиофизика. 1960. Т. 3, № 4. С. 595–605.

6. Базелян Л.Л., Брауде С.Я., Мень А.В. Рассеяние дециметрового радиоизлучения Крабовидной туманности в солнечной короне // Астрон. журн. 1970. Т. 47, № 1. С. 188–200.

7. Виткевич В.В., Антонова Т.Д., Власов В.И. Наблюдения флуктуаций интенсивности радиоизлучения квазизвездного источника 3С 48 на неоднородностях межпланетной плазмы // ДАН СССР. 1966. Т. 168, № 1. С. 55–58.

8. Виткевич В.В., Власов В.И. Радиоастрономические наблюдения солнечного ветра // Астрон. циркуляр. 1966. № 396. С. 1–4.

9. Виткевич В.В., Власов В.И. Характеристики межпланетных электронных неоднородностей по наблюдениям 1967–69 гг. // Астрон. журн. 1972. Т. 49, № 3. С. 555–606.

10. Власов В.И., Шишов В.И., Шишова Т.Д. О крупномасштабной структуре межпланетной плазмы // Письма в "Астрон. журн." 1976. Т. 2, № 5. С. 248–250.

11. Власов В.И., Чашей И.В., Шишов В.И., Шишова Т.Д. Межпланетная плазма по радиоастрономическим данным // Геомагнетизм и аэронавтика. 1979. Т. 19, № 3. С. 401–424.

12. Шишов В.И., Власов В.И., Чашей И.В. О возможной схеме 11-летней модуляции космических лучей в свете последних радиоастрономических данных // Там же. 1982. Т. 21, № 1. С. 10–14.

13. Власов В.И. О возможности прогнозирования геофизической активности по межпланетным мерцаниям радиоисточников // Там же. 1981. Т. 21, № 3. С. 441–444.

14. Шишова Т.Д. Спектры мерцаний на неоднородностях межпланетной плазмы // Астрон. циркуляр. 1974. № 819. С. 1–3.

15. Колосов М.А., Яковлев О.И., Ефимов А.И. О распространении радиоволн в

околосолнечном и межпланетном пространстве // Исследование космического пространства. М.: Наука, 1965. С. 237–243.

16. Яковлев О.И., Ефимов А.И., Трусов Б.Л. и др. Исследование распространения дециметровых радиоволн в околосолнечной плазме с помощью аппарата "Марс-2" // Космич. исслед. 1974. Т. 12, № 4. С. 600–605.

17. Савич Н.А. Общие свойства дисперсионных интерферометров // РЭ. 1967. Т. 12, № 4. С. 606–611.

18. Савич Н.А., Андреев В.В., Бехтерев Ю.М. и др. Измерение вариаций интегральной концентрации на трассе связи со станцией "Марс-2" методом дисперсионного интерферометра // Космич. исслед. 1973. Т. 11, № 5. С. 756–760.

19. Колосов М.А., Савич Н.А., Васильев М.Б. и др. Исследования околосолнечной плазмы методом дисперсионного интерферометра при помощи спутников "Венера-9-10" // УФН. 1977. Т. 123, № 4. С. 700–701.

20. Колосов М.А., Савич Н.А., Яковлев О.И. Радиоастрономические исследования планет и Солнца с помощью космических аппаратов // Проблемы современной радиотехники и электроники / Под ред. В.А. Котельникова М.: Наука, 1980. С. 58–94.

21. Шишова Т.Д., Мингалиев М.Г. Межпланетные мерцания радиоисточника 3С-279 по наблюдениям на РАТАН-600 // Письма в "Астрон. журн." 1980. Т. 6, № 4. С. 218–222.

22. Блумс Д.Ф., Лотова Н.А. Сороченко Р.Л. Межпланетные мерцания мазерных источников линии водяного пара // ДАН СССР. 1981. Т. 260, № 3. С. 570–573.

23. Лотова Н.А. Радиоастрономические исследования неоднородной структуры околосолнечной плазмы // УФН. 1968. Т. 195, № 5. С. 293–312.

24. Блюх П.В., Синицын В.Г., Фукс И.М. Рефракция и рассеяние в солнечной короне при затменных неоднородностях космических источников // Астрон. журн. 1969. Т. 46, № 2. С. 348–358.

25. Гинзбург В.Л., Писарева В.В. О природе колебаний интенсивности солнечного радиоизлучения и неоднородностях в солнечной короне // Тр. 5-го совещ. по вопросам космогонии, 9–12 марта 1955 г. М.: Изд-во АН СССР, 1956. С. 229–241.

26. Писарева В.В. О дифракции радиоволн на хаотических неоднороднос-

тях интенсивности солнечного и космического радиоизлучения // Астрон. журн. 1958. Т. 36, № 1. С. 112–128.

27. *Шишов В.И.* К теории распространения волн в случайно-неоднородных средах // Изв. вузов. Радиофизика. 1968. Т. 11, № 6. С. 866–875.

28. *Гочелашвили К.С., Шишов В.И.* Волны в случайно-неоднородных средах. М.: ВИНТИ, 1981. 144 с. (Итоги науки и техники. Сер. Радиофизика. Физические основы электроники. Акустика; Т. 1).

29. *Гершман Б.Н., Ерухимов Л.М., Яшин Ю.Я.* Волновые явления в ионосферной и космической плазме. М.: Наука, 1984. 392 с.

30. *Лотова Н.А., Чашей И.В.* Тест для обнаружения тонкой структуры солнечного ветра // Изв. вузов. Радиофизика, 1973. Т. 16, № 4. С. 491–501.

31. *Лотова Н.А., Чашей И.В.* Развитие радиоастрономических исследований скорости солнечного ветра // Тр. ФИАН. 1977. Т. 93. С. 78–118.

32. *Лотова Н.А., Рухадзе А.А.* О природе неоднородной структуры межпланетной плазмы // Астрон. журн. 1968. Т. 45, № 2. С. 343–347.

33. *Чашей И.В., Шишов В.И.* О турбулентности межпланетной плазмы // Геомагнетизм и аэрономия. 1977. Т. 17, № 6. С. 984–993.

34. *Гинзбург В.Л.* Распространение электромагнитных волн в плазме. М.: Наука, 1967. 552 с.

35. *Ефимов А.И., Яковлев О.И.* Особенности распространения радиоволн в околосолнечном и межпланетном пространстве // Электромагнитные волны в атмосфере и космическом пространстве. М.: Наука, 1986. С. 171–179.

36. *Яковлев О.И., Ефимов А.И., Разманов В.М.* и др. Неоднородная структура и скорость движения околосолнечной плазмы по данным станции "Венера-10" // Астрон. журн. 1980. Т. 57, № 4. С. 790–798.

37. *Яковлев О.И., Ефимов А.И., Рубцов С.Н.* Динамика и турбулентность солнечного ветра в области его формирования по данным радиосвечения с применением аппаратов "Венера-15, -16" // Космич. исслед. 1987. Т. 25, № 2. С. 251–257.

38. *Колосов М.А., Яковлев О.И., Ефимов А.И.* и др. Исследование распространения дециметровых радиоволн в околосолнечной плазме при полете межпланетной станции "Венера-10" // РЭ. 1978. Т. 23, № 9. С. 1829–1839.

39. *Блумс Д.Ф., Лотова Н.А., Сороченко Р.Л.* Переходная область солнечного ветра по наблюдениям мерцаний мазерного источника линии водяного пара // Геомагнетизм и аэрономия. 1984. Т. 24, № 4. С. 573–540.

40. *Антонова Т.Д., Панаджан В.Г., Пынзэр А.В.* Оценка интенсивности мерцающего компонента Крабовидной туманности в диапазоне $\lambda = 3,5 \pm 7,5$ м // Астрон. журн. 1971. Т. 48, № 1. С. 19–23.

41. *Бедевкин В.Ф., Виткевич В.В.* Наблюдения свехкороны Солнца в 1964–1965 гг. и характер рассеивающих неоднородностей в свехкороне // Тр. ФИАН, 1967. Т. 38. С. 96–102.

42. *Соболева Н.С., Тимофеева Г.М.* Анализ просвечивания поляризационного радиоизлучения Крабовидной туманности сквозь околосолнечную плазму в 1977–1982 гг. // Письма в "Астрон. журн." 1983. Т. 9, № 7. С. 409–414.

43. *Чашей И.В., Шишов В.И.* Турбулентность солнечного ветра в области ускорения // Астрон. журн. 1983. Т. 60, № 3. С. 594–601.

44. *Чашей И.В., Шишов В.И.* Турбулентность в атмосфере Солнца и межпланетной плазме // Там же. 1984. Т. 61, № 3. С. 474–482.

45. *Чашей И.В., Шишов В.И.* Турбулентность в атмосфере Солнца и формирование солнечного ветра // ДАН СССР. 1983. Т. 272, № 2. С. 320–323.

46. *Власов В.И.* Межпланетная плазма в 11-летнем цикле солнечной активности (по радиоастрономическим данным) // Геомагнетизм и аэрономия. 1983. Т. 23, № 3. С. 475–477.

47. *Виткевич В.В.* Свехкорона Солнца по наблюдениям 1951–1959 гг. Астрон. журн. 1960. Т. 37, № 1. С. 32–41.

48. *Власов В.И., Шишов В.И., Шишова Т.Д.* Вариации параметров межпланетных мерцаний и типы возмущений в межпланетной плазме // Геомагнетизм и аэрономия. 1983. Т. 23, № 6. С. 888–893.

49. *Власов В.И.* Межпланетные ударные волны по наблюдениям мерцаний радиоисточников // Там же. 1981. Т. 21, № 5. С. 927–929.

50. *Власов В.И., Шишов В.И., Шишова Т.Д.* Структура распространяющихся возмущений межпланетной плазмы // Там же. 1984. Т. 24, № 4. С. 541–545.

51. *Власов В.И., Шишов В.И., Шишова Т.Д.* Связь между вариациями индекса геомагнитной активности и параметров межпланетных мерцаний // Там же. 1985. Т. 25, № 2. С. 254–258.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Список используемых сокращений названий учреждений	5
I. СОВЕТСКИЕ РАДИОТЕЛЕСКОПЫ И РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТРЫ	6
Глава 1. Советские радиотелескопы.	6
Введение	6
1.1. Зеркальные радиотелескопы	15
1.2. Радиотелескопы с расчлененной зеркальной поверхностью	46
1.3. Многоэлементные радиотелескопы с незаполненной апертурой	62
1.4. Радиотелескопы с фазированными решетками	100
Глава 2. Радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами	107
Введение	107
2.1. Принцип действия радиоинтерферометра.	108
2.2. Технические реализации радиоинтерферометров	109
2.3. Радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами. История возникновения и развития	112
2.4. Перспективы развития радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами	124
Глава 3. Радиоинтерферометры со сверхдлинными базами — новое средство решения задач астрометрии, геодинамики, службы времени и космической навигации.	126
II. РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СОЛНЦА И МЕЖПЛАНЕТНОЙ ПЛАЗМЫ.	135
Глава 4. Радиоастрономические исследования Солнца в СССР.	135
4.1. Методы солнечной радиоастрономии.	136
4.2. Свойства основных компонент радиоизлучения Солнца	143
4.3. Диагностика плазмы солнечных вспышек и прогноз их геоэффективности	167
Глава 5. Открытие и исследование сверхкороны Солнца и межпланетной плазмы	170
5.1. История развития исследований	170
5.2. Современные представления о сверхкороне Солнца и межпланетной плазме: в результате исследований	175
Литература	190

CONTENTS

Preface	3
Abbreviations	5
I. SOVIET RADIO TELESCOPES AND RADIO INTERFEROMETERS	6
Chapter 1. Soviet radio telescopes	6
Introduction.	6
1.1. Reflecting radio telescopes	15
1.2. Radio telescopes with a dismembered reflecting surface	46
1.3. Multi-element radio telescopes with unfilled aperture.	62
1.4. Radio telescopes with phased arrays.	100
Chapter 2. Radio interferometry with very long baselines	107
Introduction.	107
2.1. Principle of operation of a radio interferometer	108
2.2. Technical realizations of radio interferometers.	109
2.3. Radio interferometry with very long baselines. Background of advent and development	112
2.4. Prospects for development of radio interferometry with very long baselines. . .	124
Chapter 3. Radio interferometry with very long baselines — a new means to solve problems in Astrometry, Geodynamics, Time Service and Space Navigation	126
II. RADIO ASTRONOMICAL INVESTIGATIONS OF THE SUN AND INTERPLANETARY PLASMA	135
Chapter 4. Radio astronomical investigations of the Sun.	135
4.1. Methods of solar radio astronomy	136
4.2. Properties of the main components of solar radio emission.	143
4.3. Plasma diagnostics of solar flares and prediction of their geoeffectiveness	167
Chapter 5. The detection and investigation of the super-corona of the Sun and of interplanetary plasma.	170
5.1. The past history of research	170
5.2. The present understanding of the solar supercorona and of interplanetary plasma: results of investigations	175
References	190

Научное издание

Гельфрейх Георгий Борисович,
Зайцев Валерий Васильевич,
Илясов Юрий Петрович и др.

**СОВЕТСКИЕ РАДИОТЕЛЕСКОПЫ
И РАДИОАСТРОНОМИЯ
СОЛНЦА**

*Утверждено к печати
Сибирским институтом
земного магнетизма, ионосферы
и распространения радиоволн
СО АН СССР*

Редактор
Т.С. Смирнова

Художник
С.А. Резников

Художественный редактор
В.В. Алексеев

Технический редактор
Г.П. Каренина

Корректор
Н.И. Харламова

**Набор выполнен в издательстве
на наборно-печатающих автоматах**

ИБ № 46781

**Подписано к печати 30.11.89. Т – 19018
Формат 60 × 90 1/16. Бумага офсетная № 1
Гарнитура Пресс-Роман. Печать офсетная
Усл.печ.л. 13,5. Усл.кр.-отт. 14,0. Уч.-издл. 16,3
Тираж 800 экз. Тип. зак. 2137. Цена 3р. 50к.**

**Ордена Трудового Красного Знамени
издательство "Наука"
117864 ГСП-7, Москва В-485,
Профсоюзная ул., д. 90**

**Ордена Трудового Красного Знамени
1-я типография издательства "Наука"
199034, Ленинград В-34, 9-я линия, 12**

ИЗДАТЕЛЬСТВО "НАУКА"

Вышли из печати книги:

Вайнштейн С.И., Быков А.М., Топтыгин И.Н. Турбулентность, токовые слои и ударные волны в космической плазме. — 20 л. 3р.90к.

Монография посвящена центральным вопросам космической электродинамики, проблемам формирования токовых слоев, ускорению частиц и ударных волн. Показано, что в результате возникновения токовых слоев происходит нагрев верхних слоев атмосферы, солнечные вспышки и другие активные явления.

Для специалистов в области физики космической плазмы.

Современные проблемы физики и эволюции звезд. — 20 л. — 3р.90к.

Сборник включает новейшие результаты исследований советских астрофизиков, посвященных различным аспектам теории звездной эволюции. Подробно рассмотрены последние достижения астрономов в изучении звездообразования и физики молодых звезд, эволюции тесных двойных звезд, физики нестационарных объектов и моделей Солнца.

Для астрофизиков.

Гагаринские научные чтения по космонавтике и авиации. — 20 л. — 3р.80к.

В сборник включены материалы Гагаринских научных чтений. Рассмотрены проблемы космической технологии, механики полета, систем управления летательными аппаратами, применения космических аппаратов для решения народнохозяйственных задач. Освещены проблемы проектирования, конструирования, отработки летательных аппаратов.

Для специалистов по авиации и космонавтике.

**Адреса книготорговых предприятий "Академкнига"
с указанием магазинов и отделов "Книга—почтой"**

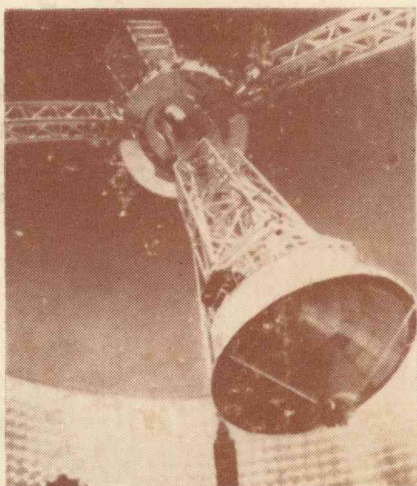
Магазины "Книга—почтой":

252107 Киев, ул. Татарская, 6; 197345 Ленинград, ул. Петрозаводская 7; 117393 Москва, ул. Академика Пилюгина, 14, корп. 2.

Магазины "Академкнига" с указанием отделов "Книга—почтой":

480091 Алма-Ата, ул. Фурманова, 91/97 "Книга—почтой"; 370001 Баку, ул. Коммунистическая, 51 "Книга—почтой"; 232600 Вильнюс, ул. Университето, 4 "Книга—почтой"; 690088 Владивосток, Океанский пр-т, 140 "Книга—почтой"; 320093 Днепропетровск, пр-т Гагарина, 24 "Книга—почтой"; 734001 Душанбе, пр-т Ленина, 95 "Книга—почтой"; 375002 Ереван, ул. Туманяна, 31; 664033 Иркутск, ул. Лермонтова, 289 "Книга—почтой"; 420043 Казань, ул. Достоевского, 53 "Книга—почтой"; 252030 Киев, ул. Ленина, 42; 252142 Киев, пр-т Вернадского, 79; 252025 Киев, ул. Осиленко, 17; 277012 Кишинев, пр-т Ленина, 148 "Книга—почтой"; 343900 Краматорск Донецкой обл., ул. Марата, 1 "Книга—почтой"; 660049 Красноярск, пр-т Мира, 84; 443002 Куйбышев, пр-т Ленина, 2 "Книга—почтой"; 191104 Ленинград, Литейный пр-т, 57; 199164 Ленинград, Таможенный пер., 2; 194064 Ленинград, Тихорецкий пр-т, 4; 220012 Минск; Ленинский пр-т, 72 "Книга—почтой"; 103009 Москва, ул. Горького, 19-а; 117312 Москва, ул. Вавилова, 55/7; 630090 Новосибирск, Морской пр-т, 22 "Книга—почтой"; 630076 Новосибирск, Красный пр-т., 51; 142284 Протвино Московской обл., ул. Победы, 8; 142292 Пушкино Московской обл., ул. МР "В", 1 "Книга—почтой"; 620151 Свердловск, ул. Мамина-Сибиряка, 137 "Книга—почтой"; 700000 Ташкент, ул. Ю. Фучика, 1; 700029 Ташкент, ул. Ленина, 73; 700070 Ташкент, ул. Ш. Руставели, 43; 700185 Ташкент, ул. Дружбы народов, 6 "Книга—почтой"; 634050 Томск, наб. реки Ушайки, 18; 450059 Уфа, ул. Р. Зорге, 10 "Книга—почтой"; 450025 Уфа, ул. Коммунистическая, 49; 720001 Фрунзе, бульвар Дзержинского, 42 "Книга—почтой"; 310078 Харьков, ул. Чернышевского, 87 "Книга—почтой"

3 р. 50 к.



СОВЕТСКИЕ РАДИОТЕЛЕСКОПЫ И РАДИОАСТРОНОМИЯ СОЛНЦА

• НАУКА •