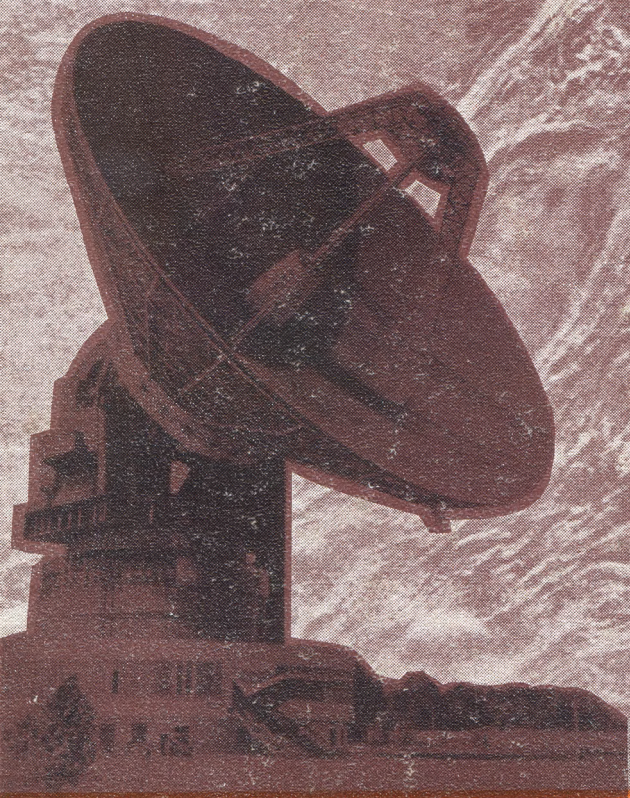


АКАДЕМИЯ НАУК СССР

РАЗВИТИЕ РАДИОАСТРОНОМИИ В СССР



«НАУКА»

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ИНСТИТУТ РАДИОТЕХНИКИ И ЭЛЕКТРОНИКИ

РАЗВИТИЕ РАДИОАСТРОНОМИИ В СССР

Ответственный редактор

доктор физико-математических наук

А.Е. САЛОМОНОВИЧ



МОСКВА "НАУКА" 1988

Авторы: Л.М. Гиндилис (гл. 7), Р.Д. Дагкесаманский (гл. 1), А.Д. Кузьмин (гл. 1 и 5), И.Д. Новиков, (гл. 3), О.Н. Ржига (гл. 6), Р.Л. Сороченко (гл. 2), В.С. Троицкий (гл. 4), В.М. Чаругин (гл. 3), Н.М. Цейтлин (гл. 8)

Развитие радиоастрономии в СССР / Л.М. Гиндилис, Р.Д. Дагкесаманский, А.Д. Кузьмин и др. — М.: Наука, 1988. 222 с. ISBN 5-02-000764-1.

Систематизированный обзор развития отечественной радиоастрономии за 1947—1987 гг. Приведены важнейшие результаты исследований источников радиоизлучения в Галактике и Метагалактике, в том числе квазаров, космических мазеров, пульсаров, радиогалактик. Описаны открытия космических спектральных радиолоний, достижения советской радиоастрономии Луны, планет и планетной радиолокации, включая получение уникальных радиолокационных изображений поверхности Венеры. Освещена роль радиоастрономии в решении современных проблем космологии и задач поисков внеземных цивилизаций. Отражены результаты применения методов радиоастрономии в народном хозяйстве, в том числе в метеорологии, геодезии, при антенных измерениях и создании радиоастрономических стандартов времени.

Предназначена для специалистов в областях астрономии, радиофизики и электроники, метеорологии, преподавателей, аспирантов и студентов, читателей, интересующихся историей науки и техники.

Табл. 5. Ил. 35. Библиогр.: 683 назв.

Рецензенты: Б.Г. Кутуза, В.И. Слыш

The systematic review of radio astronomy development in the Soviet Union during 1947—1987 period. The most important results of radio sources in Galaxy and Metagalaxy investigations are summarized. The special attention is displayed to quasars, cosmic masers, pulsars and radio galactics investigations. The discovery and investigations of cosmic spectral radio lines, the achievements of soviet radio astronomy of the Moon and planets together with radar planet astronomy are set forth. The process of unique radar maps of Venus surface obtaining is described. The connections of radio astronomy with resolving of modern cosmological problems are elucidated, as well as radio astronomical aspects of SETI problem. The special chapter of monography is devoted to description of radio astronomical methods applications to practical aims, particularly to meteorology, geodesy, to antenna measurements and to radio astronomical time standard realization.

The monography will be useful to specialists in astronomy, radio physics, electronics and meteorology as well to teachers and postgraduated in these disciplines. This book will be interesting for all who is involved in the history of science and technology.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Древнейшая из наук — астрономия за тысячелетия своей истории пережила по крайней мере два периода бурного, скачкообразного развития, определяемых иногда (см., например, [1, 1a]) как революции в астрономии. Первый такой период, имевший место в середине XVI—начале XVII в., связан с именами Коперника и Галилея. Изобретение телескопа и отказ от геоцентрического мировоззрения, утверждение гелиоцентрической системы дали начало эпохе бурного прогресса астрономии в течение последующих трех столетий. Создание небесной механики Ньютоном, развитие звездной астрономии, открытие Кирхгофом спектрального анализа, позволившее начать изучение физических процессов в небесных телах, т.е. возникновение астрофизики, открытие Метагалактики, а затем и закона красного смещения спектральных линий далеких галактик, подтвердившее теорию расширяющейся Вселенной, развитую ранее А.А. Фридманом, исходя из общей теории относительности А. Эйнштейна, — вот некоторые из фундаментальных открытий этой эпохи [2].

Начало второй революции в астрономии наступает вслед за окончанием второй мировой войны. Произошел крутой поворот от приема и анализа электромагнитного излучения светящихся космических источников в видимой глазом оптической области спектра к практически необъятному диапазону электромагнитных волн.

Классическая астрономия, даже вооруженная телескопами, ранее получала всю информацию в весьма узком спектральном интервале: примерно от 0,5 и до 0,8 мкм. Как известно, препятствием расширения спектрального интервала считалось поглощение космического излучения вне этого "окна прозрачности" земной атмосферой. Соответственно отсутствовали необходимые инструменты.

Предвестником наступления новой эпохи в астрономии явилось случайное открытие в 1932 г. американским инженером К. Янским фонового излучения Галактики на радиоволнах [3]. Однако в то время "классические" астрономы фактически не придали значения опубликованному в техническом журнале открытию, сделавшемуся возможным из-за наличия в земной атмосфере, как оказалось, второго "окна" на волнах длиной примерно от 1 мм и вплоть до нескольких десятков метров. Бурное развитие радиофизики и радиотехники в связи с задачами радиосвязи и радиолокации сделали возможным построение чувствительных приемных устройств и направленных антенн — радиотелескопов, пригодных для изучения космических объектов не только в видимом, но и в радиодиапазоне. Оказалось также, что многие астрономические объекты или важные их свойства могут быть исследо-

дованы именно в радиоволнах соответствующей длины. На стыке астрофизики и радиофизики возникла новая отрасль науки — радиоастрономия.

Развитие ракетно-космической техники, позволившее выносить телескопы за пределы атмосферы Земли, довольно скоро сделало астрономию всеволновой. Вслед за наземной радиоастрономией наступила эпоха коротковолновой ультрафиолетовой, рентгеновской и гамма-астрономии. Границы используемых радиоволн также расширились как в длинноволновую сторону, так и в сторону субмиллиметровых и инфракрасных волн.

Качественный скачок в методах и средствах исследований повлек за собой открытие совершенно новых космических объектов, явлений и процессов. В отличие от периода, следовавшего вслед за первой революцией в астрономии, когда Вселенная, изучаемая неизмеримо более глубоко, чем ранее, все же в общем рассматривалась как статическая, теперь стала очевидной ее эволюционная природа. Выяснилось, что во Вселенной и в наше время идут процессы рождения, развития и гибели звезд, звездных систем — галактик, происходят бурные термоядерные взрывы, являющиеся поставщиком энергии, что Вселенная далека от равновесия.

Более чем за 40 лет, прошедших со времени начала бурного развития радиоастрономии, накоплен огромный совершенно новый научный материал, развиты и обоснованы принципиально новые теории, разработаны невиданные ранее методы и средства астрономических наблюдений, произошло тесное сращивание радиофизики и радиотехники, физики плазмы и магнитодинамики, физики космических лучей с астрофизикой. Наступило время подведения некоторых итогов предшествующего развития радиоастрономии. Поэтому конец 70-х и 80-е годы характерны появлением ряда монографий, сборников и обзоров, посвященных результатам предшествующих десятилетий (см., например, [4—6]). Предлагаемая коллективная монография относится к этому ряду.

Приступая к ознакомлению с монографией, стоит уяснить два немаловажных вопроса.

1. Следует ли сегодня настаивать на существовании радиоастрономии как отрасли науки? Ведь по существу радиоастрономия — часть астрономии, характеризующаяся лишь использованием радиодиапазона электромагнитных волн. С таким же, видимо, правом можно говорить и о наличии ныне, после возникновения ракетно-космических средств, и ультрафиолетовой, рентгеновской или гамма-астрономии. Однако ответ на поставленный вопрос не так прост.

Дело в том, что, будучи на самом деле частью астрономии, ее отраслью, радиоастрономия обладает совершенно специфическими особенностями, причем не только с точки зрения особенностей своих инструментальных средств (радиотелескопов, радиоинтерферометров, высокочувствительных квантовых усилителей и т.п.). Радиоастрономия ставит и успешно решает специфические задачи, непосильные для оптической астрономии. Это утверждение можно про-

иллюстрировать на многих примерах, простейший из которых, возможно, — определение с помощью наземных радиотелескопов температуры поверхности Венеры, покрытой облачным плотным слоем. Радиоастрономия позволила обнаружить в Галактике существование устойчивых атомов углерода, возбужденных до столь высоких уровней энергии, что их линейные размеры достигают долей миллиметра. Не менее убедительным примером уникальности задач, решаемых с помощью радиоволн, служит получение радиоизображений мелких деталей поверхности Венеры методами радиолокационной астрономии, определение с помощью радиолокации расстояния этой планеты до Земли с невиданной точностью, выяснение направления и скорости вращения Венеры вокруг своей оси. Глобальные радиоинтерферометры, регистрирующие сигналы от одного и того же источника независимо и синхронно и расположенные на разных материках, обладают пространственным разрешением, на два-три порядка большим, чем самые крупные оптические инструменты.

Отметим также специфические возможности радиоастрономии — одной из бесспорно фундаментальных отраслей науки — решать сугубо прикладные народнохозяйственные задачи.

Таким образом, являясь отраслью астрономии (но не астрофизики только, потому что радиоастрономия приносит данные и для космологии, астрометрии и астрохимии тоже), радиоастрономия заслуживает самостоятельного изучения и развития, разумеется, в самой тесной связи с результатами, получаемыми в других диапазонах электромагнитных волн, а также и в других отраслях, таких, как физика космических лучей (теперь говорят — астрофизика высоких энергий) или нейтринная астрономия. Примером может служить решение такой комплексной проблемы, как проблема звездообразования.

2. Закономерно ли излагать развитие радиоастрономии в Советском Союзе, а не "во всемирном масштабе"? Оставляя в стороне громадность такой задачи, уточним позицию авторов настоящей монографии. Разумеется, радиоастрономия, как и любая, по крайней мере фундаментальная, наука по своей природе интернациональна. В современном научном сообществе происходит постоянная перекачка научной информации через препринты и журналы, конференции и симпозиумы. Все большее распространение, к счастью, получают совместные исследования с зарубежными коллегами. Поэтому излагать ход развития и результаты радиоастрономии в Советском Союзе в отрыве от всемирного развития просто невозможно. При таком подходе естественно объективное упоминание о существенных зарубежных работах. Вместе с тем целесообразно рассмотреть достижения отечественной радиоастрономии, чтобы объективно оценить ее вклад в мировую науку, понять сильные и слабые места, подчеркнуть области, где мы лидируем, а где необходимо ускорение развития.

Напомним, что развитие отечественной радиоастрономии началось сразу же после Великой Отечественной войны в достаточно трудных условиях [7]. Тем не менее уже в 1946—1951 гг. крупнейшие наши физики, астрофизики и радиотехники смогли выполнить пионерские

работы, являющиеся классическими, о чем свидетельствует, например, включение некоторых из них в книгу, название которой не требует комментариев [8, 9].

В 1947 г. Н.Д. Папалекси, С.Э. Хайкин и Б.М. Чихачев открыли радиоизлучение солнечной короны (см., например, [6]). В 50, 60 и в начале 70-х годов в советской наблюдательной радиоастрономии были достигнуты значительные успехи, особенно после создания крупных современных радиотелескопов, таких, как Большой Пулковский радиотелескоп в Главной астрономической обсерватории (ГАО) в 1956 г., неподвижный 31-метровый зеркальный радиотелескоп Физического института им. П.Н. Лебедева АН СССР (ФИАН) в Крыму (1957 г.), крупные полноповоротные радиотелескопы сантиметровых и миллиметровых волн РТ-22 ФИАН в Пушино (1959 г.) и РТ-22 Крымской обсерватории в Симеизе (1966 г.), диапазонный крестообразный радиотелескоп ДКР-1000 ФИАН (1965 г.) метровых волн, 8-элементная антенна Центра дальней космической связи (ЦДКС) в Крыму.

В дальнейшем создавались крупные отечественные радиотелескопы, среди которых упомянем уникальный РАТАН-600 Специальной астрофизической обсерватории (САО) в станции Зеленчукская, Т-образный радиотелескоп декаметровых волн УТР-2 Радиоастрономического института АН УССР под Харьковом, Большую сканирующую антенну (БСА) метровых волн ФИАН в Пушино, пассажный радиотелескоп миллиметровых волн РТ-25×2 Научно-исследовательского радиофизического института (НИРФИ) в Горьком. На базе двух радиотелескопов РТ-22 был создан радиоинтерферометр с независимой синхронной регистрацией (сверхдальняя радиоинтерферометрия) Симеиз—Пушино, включение которого в международную сеть позволило реализовать предельные в наземных условиях пространственные разрешения.

Среди отечественных исследований 50-х годов необходимо напомнить об открытии и исследованиях радиоизлучения внешней короны ("сверхкороны") Солнца В.В. Виткевичем (ФИАН), обнаружение круговой поляризации радиоизлучения активных областей на Солнце в ГАО, открытие линейной поляризации галактического фонового радиоизлучения В.А. Разиным (НИРФИ).

В 60-х и 70-х годах под руководством В.С. Троицкого в НИРФИ был выполнен важнейший цикл исследований радиоизлучения Луны, позволивший определить с помощью наземных радиотелескопов многие физико-химические характеристики ее приповерхностных слоев, обнаружить наличие неизвестного ранее постоянного потока тепла из лунных недр. С помощью остронаправленных радиотелескопов ФИАН, ГАО и Крымской обсерватории были получены первые радиоизображения Солнца и Луны в излучении на сантиметровых и миллиметровых волнах, в том числе в поляризованном излучении, обнаружены выбросы солнечной материи со скоростью выше критической. Было исследовано радиоизлучение Венеры и некоторых других планет, причем впервые надежно установлено наличие весьма высокой температуры на невидимой поверхности Венеры. На отечественных радиотелескопах были выполнены уникальные исследования потоков и поляризации галактических и внегалактических источников, из которых

одними из важнейших были измерения поляризации радиоизлучения знаменитой Крабовидной туманности (ФИАН).

С начала 60-х годов и в последующие годы произошло бурное развитие советской радиолокационной планетной астрономии под руководством В.А. Котельникова. Радиолокация планет позволила не только уточнить значение астрономической единицы, что было исключительно важно для развивавшейся в те годы космонавтики, но и определить ряд существенных характеристик планет.

В те же годы были начаты работы, приведшие к открытию переменности внегалактических радиоисточников. В широком диапазоне волн — от сантиметровых до декаметровых — совместными усилиями коллективов советских радиоастрономов были измерены спектры множества радиоисточников. В начале 60-х годов были начаты теоретические и экспериментальные работы, связанные с новым интересным направлением — поисками внеземных цивилизаций методами радиоастрономии. В середине 60-х годов широкое развитие получает спектральная радиоастрономия. Советскими радиоастрономами были открыты и затем исследованы рекомбинационные линии излучения возбужденного водорода в радиодиапазоне. Эти исследования, охватившие всю спектральную область, доступную в наземных условиях: от миллиметровых до декаметровых волн, привели впоследствии к непревзойденным до сих пор результатам, в частности к обнаружению наиболее низкочастотных спектральных линий — рекомбинационных линий углерода.

Следует подчеркнуть, что в отечественной радиоастрономии с самого начала и в последующем огромную роль играла разработка принципиально важных фундаментальных астрофизических проблем, открывших перспективы развития новых направлений. Теоретические исследования физики Солнца, планет, межпланетной и межзвездной среды, космических лучей, оболочек сверхновых звезд, ядер галактик, внегалактических объектов, физики расширяющейся Вселенной — эти и другие исследования, проводимые школами В.Л. Гинзбурга, Я.Б. Зельдовича, И.С. Шкловского, С.Б. Пикельнера, С.И. Сыроватского, В.В. Железнякова, В.С. Троицкого, Н.С. Кардашева и др., служили основой многих программ наблюдений и дали возможность интерпретировать получаемые результаты. При этом были предложены многие задачи и методы, широко используемые в мировой радиоастрономии.

В свою очередь, многие наблюдения позволили обосновать ряд теорий, таких, например, как теория механизма магнитно-тормозного радиоизлучения активных областей на Солнце, теория теплового излучения Луны и планет, синхротронного и теплового радиоизлучения космических источников, а также физику спектрального излучения радиолиний атомов и молекул в космическом пространстве.

В конце 70-х годов советская радиоастрономия выходит за пределы земной атмосферы. Вслед за начатыми ранее исследованиями в наиболее длинных радиоволнах, проводившимися на первых космических аппаратах, в НИРФИ (Г.Г. Гетманцевым с сотр.) и в Государственном астрономическом институте им. П.К. Штернберга

(В.И. Слышом с сотр.) (см., например, [10, 11]) проводятся первые эксперименты с параболическими антеннами в диапазонах субмиллиметровых [12] и сантиметровых [13] радиоволн на борту орбитальной пилотируемой станции, выполняются измерения характеристик поверхности и атмосферы планет и Земли как планеты с борта автоматических космических аппаратов.

Наблюдения с весьма высоким пространственным разрешением позволили с помощью наземных радиотелескопов в те же годы обнаружить так называемую радиогрануляцию на Солнце, измерить температуру спутников Юпитера. Ряд источников наблюдался в поляризованном излучении с высоким частотным разрешением в спектральных линиях атомарного водорода, гидроксила, формальдегида и водяного пара.

С высокой степенью точности в САО было установлено отсутствие пространственных флуктуаций открытого ранее А. Пензиасом и Р. Вильсоном (США) реликтового излучения; были проведены измерения интенсивности реликтового фона на ряде волн сантиметрового и миллиметрового диапазонов, в том числе в самое последнее время был выполнен уникальный эксперимент "Реликт" с борта автоматического спутника Земли (Институт космических исследований — ИКИ АН).

В 60—70-х годах на сантиметровых, дециметровых, метровых и дециметровых волнах в ФИАНе, РИАНе УССР и ИКИ АН СССР были проведены исследования открытых к тому времени радиоисточников нового типа — пульсаров: были обнаружены новые, ранее не наблюдавшиеся объекты этого типа, установлен ряд важных особенностей в структуре пульсарных импульсов. Был предложен метод использования этих импульсов в качестве стандарта частоты — "пульсарного времени". Разумеется, не все важные работы, выполненные за эти годы в Советском Союзе, были упомянуты выше.

Несмотря на существенные успехи отечественной радиоастрономии и на то, что теоретические работы советских астрофизиков и радиоастрономов продолжают быть на уровне "мировых стандартов" и в ряде случаев превосходят их, приходится констатировать, что по крайней мере в некоторых направлениях наблюдательной радиоастрономии в последнее десятилетие наблюдается определенный застой. Об этом свидетельствует изучение библиографических ссылок.

Если, например, радиолокационная астрономия в СССР продолжает лидировать, то в коротковолновой (миллиметровой и субмиллиметровой) радиоастрономии, в сверхдальней радиоинтерферометрии, радиоспектроскопии и некоторых других направлениях отечественные работы на общем фоне ныне не так уж заметны. Причиной этого является отнюдь не отсутствие идей или предложений о методах исследований, а неудовлетворительное использование радиотелескопов, отставание в оснащении их новейшей аппаратурой, медленная модернизация и замедление в темпах сооружения новых инструментов. Лишь вступление в строй новых 70- и 64-метровых зеркальных радиотелескопов в Крыму и под Москвой (Медвежьи озера), предназначенных для работы на коротких (сантиметровых) волнах, а также

завершение строительства солнечного сибирского радиотелескопа (ССРТ), состоящего из многих зеркальных антенн, Сибирским институтом земного магнетизма и распространения радиоволн (СибИЗМИР) несколько скрашивают общую картину.

Чтобы точнее оценить успехи и трудности отечественной радиоастрономии за более чем 40-летний период ее развития, Научный совет по проблеме "Радиоастрономия" АН СССР решил подготовить и издать ряд публикаций о развитии этой отрасли науки в СССР.

Первой такой публикацией явился сборник "Очерки истории радиоастрономии в СССР" [6], где рассказывалось о зарождении и главным образом о первых шагах советской радиоастрономии в различных научных учреждениях. В предлагаемой теперь читателю монографии, составленной, как и первая книга, коллективом радиоастрономов, работающих активно в науке, рассказывается о развитии радиоастрономических исследований по отдельным направлениям. Существенной особенностью настоящей монографии является также наличие в ней обширной библиографии, что позволит ознакомиться при необходимости с оригинальными публикациями, а также со специализированными обзорами и монографиями.

Монография является первой из двух запланированных. К сожалению, не удалось полностью соблюсти логическую последовательность изложения: важнейшие главы, такие, как "Советские радиотелескопы и радиоинтерферометры" и "Радиоастрономические исследования Солнца и межпланетной плазмы", отнесены к следующей книге.

Монография открывается главой "Галактическая и внегалактическая радиоастрономия", написанной канд. физ.-мат. наук Р.Д. Дагкесаманским и д-ром физ.-мат. наук А.Д. Кузьминым. Следующая глава — "Развитие космической радиоспектроскопии в СССР" (автор — д-р физ.-мат. наук Р.Л. Сороченко), посвященная спектроскопии космических атомов и молекул, развивает тему предыдущей главы. Глава 3 "Радиоастрономия и космология", написанная д-ром физ.-мат. наук И.Д. Новиковым совместно с канд. физ.-мат. наук В.М. Чаругиным, также тесно связана тематически с гл. 1, развивая ее метagalактический раздел. Главы 4—6 посвящены радиоастрономическим исследованиям Луны и планет. В первых двух из них "Радиоизлучение Луны" (чл.-кор. АН СССР В.С. Троицкий) и "Радиоастрономические исследования планет" (д-р физ.-мат. наук А.Д. Кузьмин) изложены результаты, полученные при исследованиях собственного радиоизлучения Луны и планет и их спутников. В третьей — "Радиолокационные исследования планет в Советском Союзе" (д-р физ.-мат. наук О.Н. Ржиги) — подробно рассказано о методах, теории и результатах этих исследований, причем основное внимание уделено наиболее впечатляющим результатам исследования Венеры. В заключительных главах, написанных соответственно канд. физ.-мат. наук Л.М. Гиндилисом и д-ром техн. наук Н.М. Цейтлиным, трактуются результаты применения методов радиоастрономии при решении популярной проблемы поисков внеземных цивилизаций, в которой советские радиоастрономы играют большую роль (гл. 7), и применения радиоастро-

номии в самых разнообразных смежных и даже отдаленных технических и природоведческих исследованиях, а также в народном хозяйстве (гл. 8). Поучительно, что методы, разработанные в такой фундаментальной науке, как радиоастрономия, оказываются весьма полезными, а часто просто незаменимыми в самых различных областях практики. Материалы этой да и остальных глав несомненно имеют большое познавательное значение. Коллективный характер монографии привел к известной неодинаковости стиля изложения. Но, с другой стороны, в этом, возможно, и некоторое достоинство, поскольку каждая глава отражает дух, присутствующий в разнообразных направлениях столь разветвленной ныне отрасли науки. Для удобства чтения вся библиография разбита на части, относящиеся к отдельным главам.

А.Е. Саломонович

Глава 1

ГАЛАКТИЧЕСКАЯ И ВНЕГАЛАКТИЧЕСКАЯ РАДИОАСТРОНОМИЯ

Круг вопросов, относящихся к галактической и внегалактической радиоастрономии, столь обширен, что, несмотря на все преимущества хронологической последовательности изложения, мы все же пришли к выводу о целесообразности разделения материала этой главы на разделы, посвященные отдельным классам объектов исследования. При этом, чтобы избежать дублирования, в нее не были включены сведения об отечественных исследованиях таких объектов, как области звездообразования и гигантские молекулярные облака, об анализе структуры и динамики Галактики (эти вопросы содержатся в гл. 2, посвященной спектральным радиоастрономическим исследованиям), а также лишь вкратце изложены те результаты наблюдений внегалактических источников, которые имеют прямое отношение к космологии и подробнее описаны в гл. 3.

1.1. ФОНОВОЕ РАДИОИЗЛУЧЕНИЕ ГАЛАКТИКИ

Вопрос о природе общего фонового радиоизлучения встал сразу же после проведения первых обзоров неба в конце 40-х годов. Хотя угловое разрешение радиотелескопов в то время было еще совсем невысоким (в большинстве случаев ширина луча радиотелескопа была $\sim 10^\circ$), эти обзоры позволили все же установить возрастание яркости радиоизлучения к плоскости и к центру Галактики в очень широком диапазоне длин волн. Таким образом, уже к началу 50-х годов не вызывал сомнений тот факт, что значительная, если даже не большая, часть фонового излучения имеет галактическое происхождение.

Но чем именно обусловлено это радиоизлучение?

Одним из первых предположений, выдвинутым еще К. Янским, была гипотеза, согласно которой источником наблюдаемого космического радиоизлучения был межзвездный газ. Предполагавшийся при этом тепловой механизм излучения межзвездного газа накладывал верхний предел на возможные значения яркостной температуры радиоизлучения — эти значения не должны превышать кинетическую температуру излучающего газа. Однако оказалось, что даже существенно сглаженные антенными диаграммами измеренные значения яркостных температур радиоизлучения на низких частотах во много раз превосходят известные оценки кинетической температуры межзвездного

газа. В результате предположение о существенном вкладе радиоизлучения межзвездного газа подверглось суровой критике специалистов и взамен зародилась очень популярная в 50-е годы так называемая радиозвездная гипотеза происхождения космического радиоизлучения. Более подробное изложение сложившейся ситуации и соответствующие ссылки на работы зарубежных авторов можно найти в [1].

В 1952 г. И.С. Шкловский [2] детально проанализировал появившиеся к тому времени в печати сведения о распределенном космическом излучении на нескольких волнах, главным образом дециметрового и метрового диапазонов. Ему, пожалуй, впервые удалось надежно показать, что наблюдаемое космическое радиоизлучение неоднородно как по своему пространственному распределению, так и по спектральному составу. Шкловский выделил сферическую и плоскую составляющие радиоизлучения Галактики, спектры излучения которых заметно отличались: у плоской составляющей яркостная температура возрастала с понижением частоты медленнее, чем у сферической. Используя физические основы теории поглощения, развитые при исследовании распространения радиоволн в ионосфере [3], он впервые получил правильное выражение для коэффициента поглощения межзвездного ионизованного водорода и показал, что спектральный состав его излучения хорошо соответствует спектру плоской составляющей (см. [1]). Таким образом, несмотря на очень низкое угловое разрешение первых обзоров неба и ошибки, содержащиеся в некоторых из них, уже в начале 50-х годов удалось существенно продвинуться в понимании природы фонового радиоизлучения Галактики; многие качественные выводы, сделанные Шкловским в работе [2], остаются справедливыми и сегодня.

Гипотеза о том, что заметная часть излучения плоской составляющей (особенно на высоких частотах) обусловлена тормозным излучением тепловых электронов в облаках межзвездного газа, довольно быстро нашла всеобщее признание. Более сложным оказался вопрос о природе сферической составляющей космического радиоизлучения. Мы уже упоминали, что в первой половине 50-х годов очень популярным было мнение о том, что за эту часть космического радиоизлучения ответствен особый тип звездного населения нашей Галактики. О тепловой природе излучения этой компоненты не могло быть и речи. Не говоря уже о спектре излучения, сами значения яркостной температуры, наблюдаемые в метровом диапазоне, приводили бы в этом случае к непомерно высоким значениям кинетической температуры, радиусов и полного числа таких звезд в Галактике. Однако имеющиеся данные о солнечном радиоизлучении подсказывали и другую возможность. Дело в том, что излучение возмущенного Солнца носит явно неравновесный характер. Что если среди звезд существуют и такие, у которых подобный тип излучения наблюдается гораздо чаще, чем у Солнца, и к тому же еще большей мощностью?

"Радиозвездной" гипотезы придерживались многие известные астрономы (А. Унзольд, Я. Оорт и др.); именно так попытался объяснить природу сферической составляющей радиоизлучения в своей работе

в 1952 г. и Шкловский [2]. Однако трудности, возникающие в рамках этой теории при попытках количественно объяснить наблюдаемые особенности космического радиоизлучения, быстро накапливались. И хотя многие специалисты, особенно за рубежом, всерьез использовали термин "радиозвезда" практически до конца 50-х годов, правильное объяснение природы основной части низкочастотного космического радиоизлучения было найдено довольно быстро.

В 1950 г. Х. Альвен и Н. Герлофсоном и независимо Кипенхойером для интерпретации космического радиоизлучения был предложен очень эффективный механизм неравновесного излучения. Речь идет об излучении релятивистских частиц (и в первую очередь электронов и позитронов) в магнитном поле. Если в первой из указанных работ этот механизм использовался для объяснения природы "радиозвезд", т.е. дискретных источников излучения, то во второй рассматривалось излучение релятивистских частиц в межзвездных магнитных полях. Несмотря на несомненные достоинства "нового", синхротронного, или магнитно-тормозного, механизма (физикам он был известен уже на протяжении нескольких десятков лет), за рубежом эти работы не сразу привлекли к себе внимание. Зато у нас в стране очень скоро появилось несколько работ, посвященных развитию теории этого механизма [4—6], и именно советской школе физиков и астрофизиков (Гинзбург, Гетманцев, Пикельнер, Шкловский и многие другие) принадлежит основная заслуга в том, что уже через несколько лет важность этого механизма для многих астрофизических объектов стала совершенно очевидной.

Задача интерпретации природы многих источников космического радиоизлучения, и в первую очередь фонового радиоизлучения Галактики, оказалась тесно связанной с проблемой происхождения и удержания космических лучей. Именно анализ проблемы удержания космических лучей в Галактике привел С.Б. Пикельнера [7] к выводу о существовании у нашей звездной системы короны (гало), простирающейся высоко над галактической плоскостью и представляющей чрезвычайно разреженную межзвездную плазму и связанные с ней хаотически ориентированные магнитные поля. После того как было показано, что спектр излучения релятивистских частиц с распределением по энергиям, подобным тому, которое наблюдается у первичных космических лучей, практически совпадает со спектром неравновесной компоненты космического радиоизлучения (см. [1]), уже ни у кого, по-видимому, не оставалось сомнений в том, что квазисферическая составляющая радиоизлучения Галактики связана с ее короной.

Как известно, в составе первичных космических лучей у Земли долгое время не удавалось обнаружить релятивистские электроны. Поэтому наряду с работами, где неравновесное радиоизлучение Галактики объяснялось излучением высокоэнергичных электронов в межзвездных магнитных полях, в первое время были и такие, в которых всерьез рассматривалась возможность того, что это излучение обусловлено релятивистскими протонами. Вскоре, однако, В.Л. Гинзбург [6] обратил внимание на то, что при взаимодействии ядерной компоненты космических лучей с атомами межзвездного газа должны

образовываться π -мезоны, распад которых будет приводить к появлению релятивистских электронов и позитронов. Таким образом, электронно-позитронная компонента космических лучей, излучающая гораздо эффективнее протонов и других тяжелых частиц, всегда будет присутствовать в составе заполняющих нашу Галактику космических лучей, даже если в первичном источнике ускоряются лишь протоны и более тяжелые ядра. Этот вывод был очень убедительным, и в более поздних работах уже никто не пытался привлечь для объяснения неравновесного радиоизлучения Галактики ядерную компоненту космических лучей.

Сравнительно скоро синхротронная природа фонового радиоизлучения Галактики получила новое подтверждение: в 1956 г. В.А. Разину удалось обнаружить его линейную поляризацию на волне 1,45 м [8]. Работы, которые вот уже без малого 30 лет ведутся в указанном направлении группой сотрудников НИРФИ (г. Горький) под его руководством, показали, что в довольно большой окрестности Солнечной системы (~ 3 —10 кпк) галактическое магнитное поле на положительных галактических широтах вытянуто вдоль плоскости Галактики и имеет петлевую структуру, регулярная составляющая его направлена вдоль долготы $l = 55^\circ$.

Уже в 1958 г., т.е. сразу же после запуска первого искусственного спутника Земли, Гетманцев, Гинзбург и Шкловский [9] обратили внимание на целесообразность использования новых аппаратов для наблюдения длинноволнового космического радиоизлучения. Экспериментальные работы в этом направлении, проводившиеся в последующие годы в НИРФИ и в ГАИШ МГУ на гектометровых и километровых волнах, в сочетании с наземными исследованиями в диапазоне 6,3—1000 МГц дали ценную информацию о спектре нетеплового галактического радиоизлучения в чрезвычайно широком интервале частот (см., например, [10, 11]). Более пологий, чем предполагалось ранее, интегральный спектр космического радиоизлучения на самых низких частотах и полученные на более высоких частотах сглаженные по большим участкам неба распределения интенсивности и спектрального индекса радиоизлучения удалось объяснить в рамках сравнительно простой модели распределения источников излучения и поглощающей материи в Галактике.

Таким образом, сама по себе синхротронная природа нетеплового радиоизлучения Галактики уже к концу 50-х годов ни у кого не вызывала сомнений. Иное дело — пространственное распределение соответствующей излучательной способности. Как отмечалось выше, результаты первых обзоров неплохо соответствовали представлению о том, что все радиоизлучение Галактики представляет собой совокупность плоской (или дисковой) тепловой и сферической синхротронной компонент радиоизлучения. С появлением обзоров, выполненных на радиотелескопах с более высоким угловым разрешением, стало ясно, что и нетепловое радиоизлучение Галактики, в свою очередь, тоже имеет дисковую составляющую, которая была приписана излучению спиральных рукавов, и толщина которой в несколько раз превосходила толщину диска, определяемую по тепловому излучению

межзвездного газа. Более того, в 1960 г. Дж. Болдуин (Кембридж, Англия) высказал сомнение в реальности квазисферической компоненты галактического радиоизлучения. Он пришел к выводу, что вследствие некорректного учета излучения, поступающего через боковые лепестки радиотелескопов, с помощью которых были выполнены обзоры (особенно на низких частотах), значение интенсивности радиоизлучения на больших галактических широтах оказалось сильно завышенным. Возникшая вокруг этой проблемы дискуссия продолжается и по сей день. Многие работы, в которых этот вопрос рассматривается как с наблюдательной точки зрения, так и с позиций теории, были выполнены у нас в стране.

Трудности получения однозначного ответа на вопрос на основе наблюдательных данных очевидны. Они вызваны тем обстоятельством, что радиогало Галактики надо выделить из общего фона излучения, куда входит также излучение Метагалактики и дисковая компонента галактического радиоизлучения. Спектры нетеплового излучения всех указанных составляющих в диапазоне метровых и дециметровых волн не сильно отличаются, а пространственное их разделение сложно, поскольку наблюдатель располагается внутри всех трех систем. Именно поэтому, используя порой даже одни и те же данные, разные авторы приходят к существенно различным выводам. Так, одни считают, что наша Галактика обладает мощным радиогало, т.е. основное ее излучение на низких частотах возникает в областях, отстоящих от галактической плоскости примерно на 10 кпк, другие склонны считать размеры и светимость радиогало значительно более скромными, наконец, третьи полагают, что такого образования и вовсе нет (обзор современного состояния этой проблемы можно найти в [12]).

Надо заметить, однако, что все эти выводы зависят не только от принятой модели, но и просто получаются лишь при целом ряде конкретных предположений (например, о спектрах и интенсивностях метагалактической и дисковой компонент), многие из которых зачастую недостаточно обоснованы. В этой ситуации совершенно справедливым представляется замечание, неоднократно высказывавшееся Гинзбургом, о том, что поскольку существование радиогало (т.е. радиоизлучения, возникающего на значительном расстоянии от плоскости Галактики) однозначно следует из хорошо установленного наблюдательного факта, а именно высокой степени изотропии первичных галактических космических лучей у Земли и очевидных динамических представлений, впервые сформулированных Пикельнером [7], то обсуждению при подобном анализе могут подлежать лишь его количественные характеристики, такие, как общая протяженность, плотность энергии космических лучей и магнитного поля и, как следствие, его излучательная способность.

В.Л. Гинзбургом, С.И. Сыроватским и их учениками была подробно рассмотрена задача движения космических лучей в Галактике и различные модели гало, а также соответствие этих моделей экспериментальным данным. В результате оказалось, что две наиболее разработанные, а именно диффузионная и конвективная, модели радиогало при соответствующем подборе параметров вполне могут

быть согласованы с имеющимися данными о спектре и степени анизотропии первичных космических лучей у Земли и с результатами наблюдений фонового радиоизлучения на различных частотах. Тогда возникла мысль сопоставить предсказания каждой из этих моделей с распределениями яркости, наблюдаемыми в других, сравнительно близких спиральных галактиках. Наиболее удобными для подобных исследований оказываются галактики, наблюдаемые "с ребра". Первые наблюдения такого типа были выполнены по инициативе Гинзбурга в Кембридже (Англия) для одной из близких галактик NGC 4631. В настоящее время имеются довольно детальные сведения о радиоизлучении нескольких спиральных галактик, наблюдаемых "с ребра". Совокупность этих данных свидетельствует в пользу диффузионной модели гало спиральных галактик с коэффициентом диффузии $\sim 10^{29}$ см²/с. Следует заметить, однако, что подобные наблюдения пока были выполнены только на частотах выше 400 МГц. В большинстве случаев заметное радиоизлучение исходит из эллипсоида с малой осью в 1—3 кпк, т.е. примерно на порядок меньше диаметра диска галактики. И наконец, радиосветимость исследованных с этой целью галактик во всех случаях выше (а в большинстве случаев заметно выше) радиосветимости нашей Галактики, поэтому параллель, проводимая между результатами этих наблюдений и ситуацией в нашей Галактике, представляется не вполне правомочной.

Для более определенного ответа на вопрос о протяженности и интенсивности радиогало необходимо было бы провести аналогичные исследования с тем же угловым разрешением, но на более низких частотах и притом желательно для объектов более низкой светимости, чтобы сопоставить результаты соответствующих наблюдений с тем, что мы имеем в нашей Галактике. Однако следует иметь в виду, что при этом мы переходим уже к исследованию объектов, яркость которых становится соизмеримой с флуктуациями яркости фонового радиоизлучения, наблюдаемыми даже на значительных галактических широтах, и корректный анализ, если он вообще будет возможен, потребует неплохого знания углового спектра этих флуктуаций. Сложность этой задачи наглядно иллюстрируется тем, что наблюдения туманности Андромеды, выполненные на частоте 102 МГц даже на одном и том же радиотелескопе, при различном подходе к обработке, и главным образом к проведению нулевого уровня, привели авторов двух работ [13, 14] к прямо противоположным выводам относительно доли излучения гало в общем радиоизлучении этой галактики. И все же хочется надеяться, что будущие наблюдения как фона радиоизлучения нашей Галактики, так и структуры других галактик, позволяют лучше понять строение и природу "горячих корон", которые должны существовать вокруг спиральных галактик, подобных нашей Галактике.

Поскольку нетепловое радиоизлучение Галактики обусловлено излучением релятивистских электронов (и позитронов) в межзвездных магнитных полях, то радионаблюдения несут информацию не только о галактических лучах, но и о структуре этих магнитных полей. Один из путей извлечения такой информации состоит в исследова-

нии поляризации фонового радиоизлучения, о чем уже упоминалось выше. Но случайный характер магнитного поля будет приводить к возникновению флуктуаций в распределении радиояркости фона, что позволяет получить из радионаблюдений оценку характерного размера магнитных неоднородностей. Впервые на это обстоятельство указал Гетманцев [15], и он сам получил соответствующее значение характерного размера неоднородностей: ~ 75 пк. На соответствующую возможность было указано и в монографии С.А. Каплана и С.Б. Пикельнера [16], где предлагалось использовать для этих целей структурную функцию распределения радиояркости фонового излучения. Более строго задача была рассмотрена Г.В. Чибисовым и В.С. Птускиным [17]. Им удалось вывести соотношения, позволяющие из анализа двумерной корреляционной функции фонового излучения определить характерные размеры неоднородностей межзвездного магнитного поля, отношение напряженностей хаотической и регулярной компонент ($B_{\text{хаот}}/B_{\text{рег}}$), а также направление последней в картинной плоскости. Наблюдения области неба, близкой к галактическому полюсу, выполненные с этой целью на радиотелескопе БСА ФИАН [18] (частота 102,5 МГц), обнаружили характерный угловой масштаб $\sim 5-8^\circ$, что соответствует линейным размерам неоднородностей ~ 100 пк (при характерном расстоянии в 1 кпк), отношение ($B_{\text{хаот}}/B_{\text{рег}} \approx 1$) и направление вектора магнитного поля в картинной плоскости, примерно совпадающее с направлением ближайшего спирального рукава Галактики.

В 1980 г. на радиотелескопе РАТАН-600 были начаты наблюдения по так называемой программе "Холод". Уже первые циклы этих высокочувствительных наблюдений, анализ которых можно найти в работе [19], дали много нового, в том числе и для исследований фонового радиоизлучения Галактики. Впервые на волнах сантиметрового диапазона было зарегистрировано излучение Галактики в области антицентра и на высоких галактических широтах. Было показано, что все основные крупномасштабные детали фонового радиоизлучения в пределах исследованной полосы неба ($\alpha = 0 \div 24^{\text{h}}$, $\delta = 4^\circ 54' \pm 10'$) имеют галактическое происхождение. Спектральный индекс излучения Галактики в диапазоне 0,15—4,0 ГГц не зависит от галактической широты и равен $2,55 \pm 0,1$, т.е. $T_\gamma \approx \lambda^{2.55}$, где T_γ — яркостная температура; λ — длина волны.

Во внутреннем районе Галактики ($l \approx 38^\circ$), помимо излучения Млечного пути, сосредоточенного в пределах галактических широт $\pm 1^\circ$ (дисковая составляющая фонового радиоизлучения), было выделено излучение еще двух крупномасштабных образований, названных авторами работы [19] хромосферой и короной Галактики. Хотя поверхностная яркость этих структур заметно ниже, чем диска, интегральное излучение их на волне 7,6 см должно составлять $\sim 98\%$ всего радиоизлучения Галактики. В какой степени они связаны с излучением ближайшего внутреннего спирального рукава Галактики или со структурой типа гало Галактики, еще предстоит выяснить, и для этого потребуются, по-видимому, сопоставить уже полученные данные с распределениями яркости в других сечениях Галактики и на других частотах.

Проблемы интерпретации фонового, или распределенного, радиоизлучения Галактики, источников космических лучей и их распространение в нашей звездной системе и, наконец, проблемы физики межзвездных магнитных полей занимали значительное место в широко известных монографиях советских авторов [1, 12, 16, 20]. Каждая из этих книг не только полно отражала (на момент их выхода из печати) состояние указанных проблем, но содержала много свежих мыслей, новых результатов глубокого анализа их авторов — ведущих и общепризнанных специалистов в соответствующих областях. Все они оказали значительное влияние на развитие многих направлений исследований как у нас в стране, так и за рубежом.

1.2. РАДИОИЗЛУЧЕНИЕ ИОНИЗОВАННОГО ВОДОРОДА

Уже первые обзоры космического радиоизлучения выделили на фоне плавных изменений яркости неба локальные максимумы. Число таких максимумов, или дискретных источников радиоизлучения, заметно росло по мере повышения углового разрешения и чувствительности радиотелескопов. Природа некоторых наиболее мощных источников стала проясняться, когда с повышением точности измерения положений на небе стало возможным их отождествление с оптическими объектами. В большинстве своем эти источники отождествлялись с пекулярными галактическими (как впоследствии выяснилось остатками вспышек сверхновых звезд) или внегалактическими туманностями. В то же время уже в упоминавшейся работе [2] Шкловский обратил внимание на то, что радиоизлучение плоской составляющей, которое интерпретировалось как излучение межзвездного ионизованного водорода, должно быть весьма неоднородным. Клочковатая структура его распределения в Галактике и сравнительно плотные облака Н II, хорошо известные из оптических наблюдений, с неизбежностью должны были проявиться и на радиоизотопах, особенно на сравнительно высоких частотах, где тепловое излучение ионизованного водорода, как полагают, составляет уже заметную долю излучения диска Галактики.

Однако техника радиоастрономического приема вначале быстрее развивалась в диапазоне дециметровых волн, где и было выполнено большинство обзоров неба тех лет. Этим объясняется тот факт, что среди первых отождествленных дискретных источников радиоизлучения отсутствовали области ионизованного водорода. Лишь в 1954 г. ряд диффузных туманностей, в том числе туманности Ориона и Омега, были отождествлены с радиоисточниками, наблюдавшимися на волне 9,4 см [21]. Чуть позднее наблюдения этих туманностей были выполнены у нас в стране на волне 3,2 см (см. статью Н.Л. Кайдановского и Н.С. Кардашева в сборнике [22]). Сравнение измеренных на этих двух волнах плотностей потоков окончательно подтвердило и тепловую природу радиоизлучения обоих источников, и отождествление их с указанными диффузными туманностями.

В конце 50-х годов вступили в строй два крупных отечественных радиотелескопа сантиметрового диапазона — Большой Пулковский

радиотелескоп (БПР) и РТ-22 ФИАН в Пушино. Одно из главных мест среди наблюдательных программ на этих телескопах сразу же заняли исследования областей Н II в непрерывном спектре, которые проводились группами сотрудников под руководством Ю.Н. Парийского в ГАО АН СССР и А.Д. Кузьмина и А.Е. Саломоновича на Радиоастрономической станции (РАС) ФИАНа. В работах, выполненных в 60-е годы в ФИАНе (см., например, статью А.Д. Кузьмина в сборнике [23]), особое внимание уделялось отождествлению радиоисточников с галактическими туманностями, выявлению возбуждающих звезд и определению физических параметров этих источников. Наблюдения проводились на волнах 9,4 и 3,2 см. Всего было исследовано около сотни источников, многие из которых были тепловыми. Для большинства объектов измерения были самыми высокочастотными и в то же время достаточно надежными. Это позволяло существенно уточнить спектр радиоизлучения, который в то время был основной физической характеристикой источника. В случаях, когда удавалось установить число возбуждающих звезд и их спектральные классы, можно было предсказать и некоторые параметры соответствующих зон Стремгрена, в том числе и их радиосветимость. Именно это обстоятельство и использовал Кузьмин, предложив новый метод оценки расстояний до газовых туманностей.

Еще один метод определения расстояний до радиоисточников, отождествляемых с зонами Н II, был предложен Парийским [24]. Здесь в основу метода был положен тот факт, что отношение радиосветимости газовой туманности к ее светимости в линии H_α зависит практически только от электронной температуры T_e . Учитывая небольшой разброс значений T_e в различных туманностях, можно считать, что наблюдаемое отношение потока излучения на фиксированной радиочастоте к потоку излучения в линии H_α будет зависеть (при условии, что оптическая толщина исследуемой области $\tau \ll 1$) лишь от оптической толщины поглощающего слоя, расположенного на пути до туманности, и поэтому, предполагая определенное распределение пыли в Галактике, можно оценить расстояние до радиоисточника. Несмотря на то, что многие из использованных выше предположений справедливы лишь в грубом приближении, оба метода нашли применение и зачастую хорошо дополняли один другой.

Наблюдения галактических источников теплового излучения, выполненные на БПР в начале 60-х годов [25], представляли особый интерес еще и потому, что впервые позволили получить одномерное распределение яркости некоторых радиоисточников с довольно высоким угловым разрешением ($\sim 1'$ на волне 3,2 см). Результаты наблюдений туманностей Ориона и Омега свидетельствовали о существенно неоднородном распределении плотности в туманностях, точнее, об ее резком убывании от ядра туманности к периферии.

Большое внимание в те же годы уделялось радиоизлучению планетарных туманностей. Наблюдения отдельных объектов этого класса, которые проводились на РТ-22 ФИАН и БПР, показали, что их радиоизлучение достаточно слабое, и, следовательно, предположение о наличии в нем заметной нетепловой компоненты едва ли оправданно. Вы-

полненные несколько позднее наблюдения 14 планетарных туманностей на волне 32,5 см с использованием радиотелескопа Центра дальней космической связи [26] позволили надежно измерить соответствующие плотности потока и окончательно установить тепловой характер их радиоизлучения.

В 1955 г. были проведены первые у нас в стране наблюдения радиолинии нейтрального водорода $\lambda=21$ см [27]. Хотя непосредственным объектом этих исследований являются области нейтрального водорода, наблюдения линии $\lambda=21$ см в направлении гигантских комплексов ионизованного водорода оказались очень полезными. Так, по наблюдениям весьма сложной области Суг Х в линии 21 см и в непрерывном спектре Р.Л. Сороченко и В.И. Аriskину (см. их статью в сборнике [23]) удалось надежно показать, что локальные минимумы в распределении нейтрального водорода совпадают с максимумами теплового радиоизлучения, а точнее, с областями, где водород оказывается ионизован излучением горячих звезд. Другими словами, полная плотность межзвездного водорода оказалась распределенной (по крайней мере в этом комплексе) значительно равномернее, чем плотности каждой из указанных фаз в отдельности. Позднее подобные же области "замещения" нейтрального водорода ионизованным были обнаружены и в других гигантских газовых комплексах.

С 1964 г. после открытия радиолиний высоковозбужденных атомов водорода (Н.С. Кардашев, Р.Л. Сороченко, Э.В. Бородзич, А.Ф. Дравских, З.В. Дравских) начался новый этап в исследовании галактических зон Н II. Радионаблюдения в этих линиях позволяют изучить макроскопические движения в гигантских комплексах Н II, локализовать их на луче зрения, исследовать отклонения физических условий в этих облаках от термодинамического равновесия и т.п. (подробнее об этом см. в гл. 2). В то же время более простые (хотя и менее информативные) исследования областей Н II в непрерывном спектре продолжают играть большую роль, особенно когда речь идет о глубоких обзорах, требующих высокой чувствительности, или об обширных статистических исследованиях. Именно такие работы были выполнены в последующие годы на радиотелескопах РТ-22 ФИАН, БПР ГАО АН СССР, а позднее и на РАТАН-600.

Так, детальный обзор 16 областей Н II на волне 8,2 мм, выполненный на РТ-22 ФИАН [28], показал их сложную структуру. В протяженной оболочке низкой поверхностной яркости, как правило, обнаруживалось несколько компактных образований — плотных ядер, которые, в свою очередь, обладали внутренней структурой. Исследование туманностей в миллиметровом диапазоне в непрерывном спектре и сопоставление полученных данных с результатами наблюдений линии $H_{56\alpha}$ позволили повысить точность оценки физических параметров туманностей, и в первую очередь электронной температуры T_e . В компактной области туманности Ориона было зарегистрировано понижение T_e при переходе от центральных, более плотных частей к периферии. Подобный же градиент температуры был обнаружен также в большинстве из 44 компактных зон Н II, наблюдавшихся на БПР [29].

Обширная программа исследований галактических зон Н II, выполненная в Пулковке на радиотелескопе БПР на волне 6,4 см, позволила определить характерный линейный масштаб ярких источников теплового радиоизлучения (6—8 пк) и их распределение по z -координате, перпендикулярной галактической плоскости. Оказалось, что это распределение очень близко к распределению О-звезд, излучение которых и является основным источником ионизации подобных областей, и существенно более плоское, чем распределение теплового континуума в фоновом радиоизлучении Галактики [29]. Излучение континуума, в свою очередь, тоже оказалось очень неоднородным. Наряду с диффузным фоном, обусловленным межоблачным ионизованным водородом с плотностью $\sim 1 \text{ см}^{-3}$, были выделены крупно- и мелко-масштабная облачные структуры с более высокими значениями плотности: $\sim 3\text{—}10 \text{ см}^{-3}$ и $20\text{—}60 \text{ см}^{-3}$ соответственно [30]. Заметим, что подобная иерархическая картина в общих чертах соответствует и современным представлениям о распределении межзвездного водорода в Галактике.

Интересный цикл работ по наблюдению галактических радиоисточников (как тепловых, так и нетепловых) в непрерывном спектре и в линии поглощения 21 см был выполнен группой пулковских радиоастрономов на радиотелескопе БПР в 60—70-е годы. Сравнительно высокое угловое разрешение радиотелескопа по прямому восхождению позволило разделить некоторые компоненты источников в картинной плоскости, в то время как по профилю линии поглощения удалось локализовать каждую из них в отдельности на луче зрения (подробнее об исследованиях областей Н II в радиолиниях см. в гл. 2).

Наиболее глубокие обзоры отдельных участков неба, прилегающих к галактической плоскости, выполнены в последние годы на радиотелескопе РАТАН-600 [19]. На низких галактических широтах наблюдается мелкомасштабная ($1' \times \leq 10'$) "рябь", природа которой до сих пор не установлена. Судя по тому, что отдельные детали этой картины коррелируют на разных частотах, она отражает присутствие в Галактике большого числа слабых источников. Новая популяция галактических радиоисточников низкой светимости обнаруживается и по данным работы [31]. Вероятнее всего, это сравнительно небольшие зоны Н II, возбуждаемые В-звездами. В таком случае более детальные исследования этих объектов дадут новые важные сведения о процессе звездообразования и о структуре спиральных рукавов Галактики.

1.3. ОСТАТКИ ВСПЫШЕК СВЕРХНОВЫХ ЗВЕЗД

Несомненно, одну из самых ярких страниц в истории отечественной радиоастрономии составляют ранние работы по отождествлению некоторых радиоисточников с пекулярными галактическими туманностями — остатками вспышек сверхновых звезд — и установлению механизма их радиоизлучения. Как известно, первым дискретным источником радиоизлучения, отождествленным с оптическим объектом, был радиоисточник Телец А. Определенные в 1949 г. австралийскими радиоастрономами Дж. Болтоном и Г. Стенли координаты

наты этого источника оказались очень близки к положению хорошо известной оптической туманности М 1 (Крабовидная туманность), которую к тому времени уже практически все специалисты признавали остатком Сверхновой 1054 г. Вскоре и на месте двух других известных сверхновых: 1572 г. (Сверхновая Тихо Браге) и 1604 г. (Сверхновая Кеплера) были обнаружены сравнительно мощные радиоисточники с явно нетепловым спектром радиоизлучения.

В начале 50-х годов Шкловским была выполнена большая работа по изучению старинных хроник с целью ревизии и пополнения списка исторических Новых и Сверхновых звезд, вспыхивавших в последние тысячелетия в нашей Галактике. Результатами этого исследования явились в конце концов отождествления нескольких ярких источников радиоизлучения с остатками сверхновых звезд и общий вывод автора о том, что радиоизлучение является характернейшей чертой всех без исключения остатков вспышек сверхновых.

Далеко не всегда эти первые шаги на пути к пониманию природы нетепловых галактических радиоисточников давались легко. Весьма примечательна, например, дискуссия о природе слабой волокнистой туманности, обнаруженной на месте Кассиопеи А — самого мощного в дециметровом и метровом диапазонах дискретного источника радиоизлучения, — развернувшаяся между Шкловским, с одной стороны, и В. Бааде и Р. Минковским — с другой [32,33]. Получив уникальные по тем временам фотографии и спектры излучения этой слабой туманности, Бааде и Минковский пришли к выводу, что столкнулись в этом случае с совершенно новым типом галактических объектов, и никак не соглашались с точкой зрения Шкловского, что это еще один остаток сверхновой.

Обширный цикл работ по исследованию галактических туманностей в оптическом диапазоне был выполнен в те же годы Г.А. Шайном и В.Ф. Газе на Крымской астрофизической обсерватории. Их результаты часто использовались многими астрономами при анализе физических условий, в частности в волокнистых туманностях, отождествляемых с нетепловыми радиоисточниками. Сами Шайн и Газе совершенно правильно отождествляли радиоисточник в Близнецах с одной из интересных туманностей IC 443, однако не признали в ней остатка вспышки сверхновой [34].

Естественно, что сразу после отождествления первых радиоисточников с остатками сверхновых звезд встал вопрос о механизме их радиоизлучения. Большие наблюдаемые потоки радиоизлучения, как правило, высокие яркостные температуры, а главное, заметное возрастание интенсивности излучения на низких частотах неопровержимо свидетельствовали о нетепловом характере наблюдаемого радиоизлучения. Как уже отмечалось в разд. 1.1, примерно в то же время для объяснения нетеплового фонового радиоизлучения Галактики был предложен синхротронный механизм излучения релятивистских электронов в межзвездных магнитных полях.

По мнению Гинзбурга, источниками, поставляющими космические лучи в межзвездную среду Галактики, должны были быть вспышки сверхновых и новых звезд [6]. При этом вполне естественно было

ожидать, что по крайней мере в сравнительно молодых остатках вспышек сверхновых плотность космических лучей будет высока и они сами могут быть заметными источниками синхротронного излучения. Тот факт, что спектр радиоизлучения остатков сверхновых не отличался качественно от спектра фонового радиоизлучения, лишний раз свидетельствовал в пользу этой точки зрения.

В последующие годы эти представления нашли дальнейшее развитие в работах Гинзбурга, Пикельнера, Шкловского и других советских астрофизиков (см., например, [35, 36]); в частности, рассматривался вопрос о возможных механизмах ускорения частиц в оболочках новых и сверхновых звезд. Однако само предположение о синхротронной природе радиоизлучения остатков сверхновых все еще нуждалось в конкретной наблюдательной проверке. И такая проверка была сделана.

В 1955 г. И.М. Гордон [37] пришел к выводу, что обнаружение даже сравнительно небольшой степени линейной поляризации радиоизлучения можно было бы рассматривать как очень веский аргумент в пользу синхротронной природы излучения источника. Автор предлагал применить этот тест для выяснения механизма радиоизлучения Крабовидной туманности, спектр радиоизлучения которой был относительно плоским и, следовательно, не очень сильно отличался от спектра теплового радиоисточника.

Соответствующие наблюдения были осуществлены на 30-метровом радиотелескопе Крымской научной станции ФИАН, и уже в 1957 г. А.Д. Кузьмин и В.А. Удальцов сообщили об обнаружении заметной ($3,0 \pm 0,5\%$) степени линейной поляризации радиоизлучения Крабовидной туманности на волне 10 см [38]. Это были первые в истории радиоастрономии успешные поляризационные измерения. В том же году появилось сообщение американских радиоастрономов об измерении линейной поляризации излучения Крабовидной туманности и на волне 3,15 см. Тем самым синхротронная природа радиоизлучения этой туманности, а вместе с ней и всех остатков вспышек сверхновых была практически доказана.

В дальнейшем Удальцов продолжил работы по измерению линейной поляризации Крабовидной туманности на волнах 21, 3,3 и 1,6 см на радиотелескопе РТ-22 ФИАН (см. его статьи в сборнике [23], а также [39]). Ему удалось показать, что уменьшение степени линейной поляризации с ростом длины волны обусловлено фарадеевским вращением плоскости поляризации радиоизлучения (рис. 1.1), причем вращение это происходит главным образом в пределах самой туманности. Найденное значение меры вращения позволило получить независимую оценку плотности тепловой плазмы в источнике.

Радиоисточник Телец А (или Крабовидная туманность) — это второй по величине наблюдаемого потока радиоизлучения (после Кассиопеи А) остаток вспышки сверхновой, и ему суждено было сыграть особую роль в эволюции наших представлений об этом классе объектов. В частности, это был первый радиоисточник, сведения о структуре которого были получены по наблюдениям покрытий его Луной. На возможность использования покрытий (или затмений) ра-

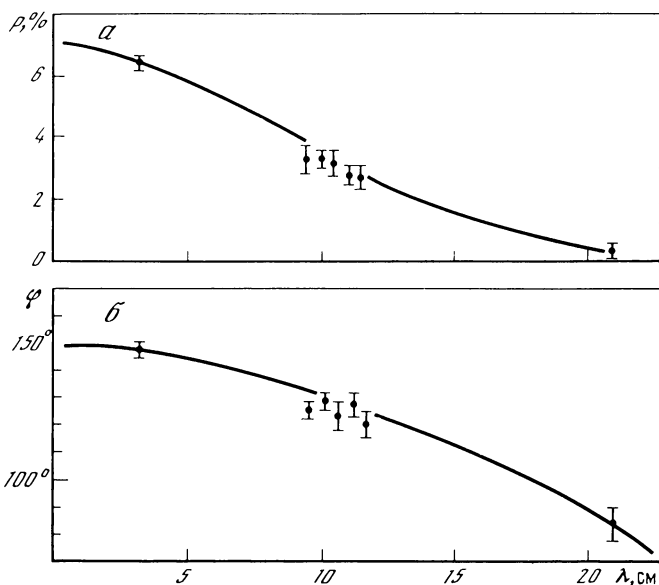


Рис. 1.1. Зависимости степени поляризации (а) и позиционного угла плоскости поляризации (б) излучения Крабовидной туманности от длины волны, по данным В.А. Удальцова (см. [23])

диоисточников Луной для исследования распределения яркости по этим объектам с достаточно высоким угловым разрешением впервые обратили внимание П.И. Бакулин и И.С. Шкловский в 1955 г. [40]. Они же предвычислили первые моменты этих покрытий для радиоисточников Телец А и в созвездии Близнецов (IC 443).

30 ноября 1955 г. В.В. Виткевичем и В.А. Удальцовым были проведены наблюдения покрытия Крабовидной туманности Луной на волнах 3,5 и 6,5 м, которые показали, что размеры туманности в радиодиапазоне не намного отличаются от размеров области оптического излучения и что ориентация больших осей обоих распределений примерно совпадает [41]. В дальнейшем с повышением чувствительности радионаблюдений этот метод стал широко использоваться для исследований структуры и более слабых радиоисточников. Что же касается Крабовидной туманности, то впоследствии еще не раз проводились наблюдения ее покрытий Луной. У нас в стране многие из них были выполнены по инициативе и при непосредственном участии Л.И. Матвеевко, которому еще в 60-е годы удалось получить довольно подробные сведения о распределении яркости в Крабовидной туманности и притом в очень широком диапазоне длин волн: от нескольких миллиметров до нескольких метров (см. например, [42, 43]). Было, в частности, установлено, что распределение радиояркости в Крабовидной туманности существенно отличается от регулярной оболочечной структуры некоторых других известных остатков сверхновых (Сверхновая Тихо Браге или Кассиопея А). Из анализа мерцаний радиоисточника Телец А на неоднородностях межпланетной плаз-

мы в метровом диапазоне ($\lambda = 3,5; 5$ и $7,9$ м) впервые надежно было показано, что положение компактного мерцающего радиоисточника совпадает с положением пульсара PSR 0532 [44].

Итак, не вызывало сомнений, что возраст по крайней мере некоторых из остатков сверхновых насчитывает всего лишь сотни лет. Определенные изменения в оптической структуре и оценки скорости разлета волокон для Крабовидной туманности были известны еще до начала радиоастрономических исследований. Очевидно, что аналогичные эффекты тем вероятнее можно было ожидать в структуре оптических волокон еще более молодых остатков сверхновых. На повестку дня встал вопрос об эволюции этих образований, а заодно и об эволюции соответствующих радиоисточников. В самом деле, что представляют собой радиоизлучающие облака, которые, помимо тепловой плазмы с магнитным полем, должны содержать и значительное количество релятивистских частиц? Находятся ли они уже в динамическом равновесии с окружающим межзвездным газом или все еще продолжают расширяться? И как при этом изменяются характеристики их радиоизлучения?

Первая попытка построить эволюционную модель такого образования была предпринята Шкловским в 1960 г. [45]. Предполагая, что процесс образования релятивистских частиц в туманности уже прекратился, т.е. их количество в процессе расширения туманности не увеличивается, а структура магнитного поля при этом остается постоянной, он показал, что плотность потока радиоисточника S должна меняться пропорционально $R^{-4\alpha-2}$, где R — радиус туманности, а α — спектральный индекс ее радиоизлучения. Для сравнительно молодых остатков сверхновых, расширение которых еще не затормозилось межзвездной средой, радиус будет пропорционален возрасту туманности t_0 . Поэтому относительный темп убывания плотности потока такого радиоисточника будет равен

$$\frac{dS/dt}{S} = \frac{4\alpha + 2}{t_0}. \quad (1.1)$$

Подставляя значения $\alpha = 0,8$ и $t_0 \approx 300$ лет, соответствующие остатку сверхновой Кассиопея А, Шкловский нашел, что плотность потока этого источника должна убывать примерно на 1,7% в год. Такую величину вполне можно было надеяться зарегистрировать, проводя измерения плотности потока источника с интервалом в несколько лет.

Это интересное предсказание сразу же привлекло внимание наблюдателей, и уже в скором времени появились оценки скорости уменьшения плотности потока радиоизлучения Кассиопеи А на различных частотах. Так, например, в работах [46, 47] по наблюдениям в сантиметровом и метровом диапазонах были получены результаты, в точности совпадающие с предсказанием модели, в то же время авторы других работ в большинстве своем склонялись к несколько меньшему значению скорости уменьшения плотности потока радиоизлучения Кассиопеи А ($\sim 1,2\%$ в год). Учитывая весьма упрощенный характер модели, и эти результаты следовало рассматривать не как расхождение с теорией, а скорее как ее блестящее подтверждение.

Были предприняты попытки поиска векового уменьшения плотностей потоков и других остатков сверхновых. Они оказались менее успешными. Сравнительно редкие сообщения о положительных результатах (см., например, [48]) были не столь уверенными, в большинстве же других работ указывались лишь грубые верхние оценки эффекта, которые не противоречили предсказаниям модели. Можно указать несколько причин этих относительных "неудач". Во-первых, Кассиопея А несомненно относится к числу наиболее молодых из известных остатков вспышек сверхновых и обладает, пожалуй, наиболее крутым спектром, а потому ожидаемый эффект для нее заметно больше, чем для других остатков сверхновых. Во-вторых, поскольку Кассиопея А — наиболее яркий радиоисточник на небе (почти во всем диапазоне радиочастот), впервые корректные измерения ее плотности потоков были выполнены намного раньше, чем для других остатков сверхновых, и потому временной интервал, на котором основывается оценка изменений плотности потока, для всех прочих остатков значительно меньше, чем для Кассиопеи А. Наконец, не исключено, что модель, которая оказалась удовлетворительной для самого молодого, с регулярной симметричной структурой остатка сверхновой, не годится для более сложных объектов того же класса, находящихся к тому же на более поздней стадии эволюции.

Наряду с поиском медленных изменений плотностей потоков остатков сверхновых, большое внимание уделялось исследованиям спектров их радиоизлучения в широком диапазоне длин волн. Не останавливаясь здесь на проблемах привязки наблюдений, выполненных на разных частотах, к единой шкале плотностей потоков (см. об этом в разд. 1.5), заметим только, что задача измерения спектров с высокой точностью не относится к числу легких и требует специально проработанной методики наблюдений.

Исследования поведения спектров дискретных источников в области самых низких (10—40 МГц) из доступных для наземных наблюдений частот были выполнены под руководством С.Я. Брауде сотрудниками РИАНа УССР (г. Харьков). В целом ряде работ (см., например, [49, 50]) были изучены низкочастотные "завалы" в спектрах остатков сверхновых Кассиопея А, НВ-3 и НВ-9, а также показано, что наиболее вероятной их причиной является межзвездное поглощение.

В 1972 г. с использованием первого в декаметровом диапазоне радиоинтерферометра со сверхдлинной базой Граково—Зименки харьковские радиоастрономы совместно с сотрудниками НИРФИ (г. Горький) получили оценку углового размера компактной детали в Крабовидной туманности на частоте 25 МГц ($1,0'' \leq \theta \leq 2,8''$) [51]. То, что он оказался заметно больше, чем на более высоких частотах, было совершенно правильно интерпретировано как результат рассеяния излучения на неоднородностях межзвездной плазмы.

Обширная программа исследований остатков вспышек сверхновых на протяжении многих лет ведется в НИРФИ. Здесь впервые были отмечены изменения плотности потока Крабовидной туманности в диапазоне дециметровых волн [52, 53], в которых на фоне плавного уменьшения потока наблюдаются и относительно резкие колебания.

Совсем недавно сотрудники НИРФИ обнаружили еще одну особенность радиоструктуры этого остатка сверхновой. Оказалось, что спектральный индекс туманности резко возрастает на ее внешней границе. Другими словами, наиболее яркая в сантиметровом и дециметровом диапазонах область излучения туманности ограничена слабой оболочкой с более крутым ($\alpha \approx 0,7$) спектром [54]. Имеется сообщение и об изменениях (возможно, даже с квазипериодом ~ 6 лет) наклона спектра Кассиопеи А, которые наблюдались в период с 1953 по 1984 г. на фоне монотонного уменьшения потока и наклона спектра этого источника [55]. Этот чрезвычайно интересный и столь же неожиданный результат пока еще нуждается в подтверждении.

Ждут своего объяснения и довольно резкие изменения спектральных индексов (так называемые "изломы" спектров) ряда остатков сверхновых, обнаруживаемые в диапазоне дециметровых волн (см., например, [56]).

По мере получения новых сведений о структуре радиоисточников, отождествляемых с остатками вспышек сверхновых звезд, постепенно выяснилось, что их нельзя считать однородным классом объектов. Помимо классических оболочечных остатков, существуют остатки сверхновых, подобные Крабовидной туманности (или так называемые плерионы), радиояркость которых спадает от центра к периферии, а также объекты промежуточного типа или вовсе не поддающиеся классификации. В некоторых из них были обнаружены компактные радиоисточники [56] или даже пульсары. Многочастотные одномерные распределения яркости Крабовидной туманности, построенные в поляризованном свете по наблюдениям на БПР, выявили в центральной части этой туманности (вокруг пульсара) каверну — область с очень низкой плотностью ионизованного газа. Помимо этого, шло накопление сведений о свойствах оптического, а позднее и рентгеновского излучения остатков сверхновых. В настоящее время удовлетворительной может быть признана уже лишь та модель остатка сверхновой, которая объяснит всю совокупность имеющихся данных и в которой найдется естественное место для каждого типа этих объектов.

Именно такой комплексный подход к физике сверхновых звезд и их остатков лежит в основе двух монографий Шкловского, опубликованных в 1966 и 1976 гг. [57]. Тот же подход характерен и для монографии Т.А. Лозинской [58], вышедшей из печати 10 лет спустя. Все три книги как нельзя лучше отражают развитие представлений об остатках вспышек сверхновых звезд, в котором если не решающую, то несомненно весьма значительную роль сыграли данные радионаблюдений.

По мнению Лозинской, частота рождения плерионных и оболочечных остатков примерно одинакова, а тот факт, что среди известных остатков плерионы составляют лишь 5—10%, объясняется не относительно малым временем жизни этих объектов, а тем, что на заключительной стадии своей эволюции они имеют вид оболочки.

Если первая стадия эволюции оболочечного остатка сверхновой в грубом приближении может быть описана автомодельным решением

Седова задачи о точечном взрыве, то для эволюции плериона (по крайней мере как радиоисточника) чрезвычайно важно наличие постоянно действующего компактного источника релятивистских частиц и магнитного поля, роль которого играет пульсар. Именно этим объясняется существенное различие распределений яркости синхротронного излучения этих двух типов остатков сверхновых. Однако по мере замедления вращения пульсара темп поставки энергии уменьшается, понижается и яркость плериона, но к этому времени на фронте расширяющейся ударной волны оказывается сформированной оболочка из уплотненного межзвездного газа. Именно эта последняя оболочка и определяет радиосветимость остатка на заключительных стадиях его эволюции. Заметим, что большое значение для правильной интерпретации радионаблюдений и их сопоставления с модельными расчетами имела работа Кардашева [59], в которой была рассмотрена эволюция спектров источников синхротронного излучения при различных вариантах изменения темпа поставки релятивистских частиц и для различных механизмов, определяющих их ускорение и энергетические потери.

В последние годы стало ясно, что даже в случае оболочечных остатков сверхновых для согласования модельных расчетов с наблюдениями (в частности, для объяснения наблюдаемого наклона зависимости радиояркость—диаметр) необходимо обеспечить дополнительное ускорение релятивистских частиц, восполняющее (хотя бы частично) их адиабатические потери. Чаще других для этих целей привлекаются активно разрабатываемые советскими физиками механизмы ускорения плазменными волнами или на фронте ударной волны (см. ссылки в [58]).

Рассматривая работы по исследованию остатков вспышек сверхновых, нельзя обойти молчанием вопрос о природе так называемых "петлевых" объектов. Первый из них — Петля I, или Северный полярный шпур, — был обнаружен как область повышенной радиояркости уже на самых первых картах галактического радиоизлучения. Это наиболее яркая часть малого круга небесной сферы, перпендикулярного плоскости Галактики, диаметром 116° и шириной $\sim 10^\circ$. В настоящее время известны и другие крупномасштабные петли галактического радиоизлучения — Петля II, III и IV. Относительно природы этих образований высказывались различные предположения. Вот два наиболее распространенных мнения на этот счет:

1) петлеобразные структуры в распределении галактического радиоизлучения отражают локальную структуру магнитного поля в окрестностях Солнечной системы;

2) эти объекты суть близко расположенные остатки сверхновых.

В последнее время вторая точка зрения, развиваемая в работах Лозинской (см. [58] и приведенные там ссылки), получила дополнительное подтверждение, поскольку было обнаружено мягкое рентгеновское излучение, ассоциирующееся с двумя объектами этого типа — Петля I и II. Согласно этой точке зрения, основная особенность остатков сверхновых, отождествляемых с петлеобразными структурами, состоит в том, что они вспыхнули в горячей разре-

женной ($n \approx 0,01 \text{ см}^{-3}$) плазме. Линейные размеры этих образований в настоящую эпоху составляют ~ 200 пк, и находятся они примерно на таком же или даже чуть меньшем расстоянии от Солнца. При этом их наблюдаемое число соответствует средней частоте вспышек сверхновых в Галактике, определяемой независимо другими методами, и они не выглядят инородными объектами ни на одной из эмпирических диаграмм, построенных для остатков вспышек сверхновых звезд.

1.4. ПУЛЬСАРЫ

Исследования пульсаров в Советском Союзе были начаты на РАС ФИАН (г. Пущино) в марте 1968 г. [60], сразу после появления в печати сообщения английских радиоастрономов об открытии этих объектов [61]. Инициатором и руководителем этих работ был В.В. Виткевич. Одна из первых записей пульсара, полученных на радиотелескопе ДКР-1000, приведена на рис. 1.2.

В отличие от исследований, проводившихся за рубежом, наблюдения пульсаров на РАС ФИАН велись на более низких частотах, в диапазоне метровых волн. Исторически это было обусловлено рабочим диапазоном частот радиотелескопа ДКР-1000. Но впоследствии выяснилось, что метровые волны весьма информативны для исследований пульсаров, так как в этом диапазоне максимальна плотность потока радиоизлучения пульсаров, наиболее высокая степень поляризации, ярче выражена тонкая временная структура импульсов и, наконец, излучение несет информацию о наиболее интересной с физической точки зрения области магнитосферы пульсара, линейная скорость вращения которой достигает значений, близких к скорости света, т.е. области, примыкающей к так называемому световому цилиндру. Наблюдения пульсаров в метровом диапазоне оказались наиболее эффективными и для исследования межзвездной среды посредством анализа эффектов распространения их импульсного излучения. В связи с этим на РАС ФИАН был создан специальный антенно-аппаратурный комплекс для измерений радиоизлучения пульсаров на метровых волнах, включавший, помимо радиотелескопа ДКР-1000, новый большой радиотелескоп БСА ФИАН, приемно-регистрирующую аппаратуру и аппаратуру службы времени.

С 1970 г. наблюдения пульсаров на еще более низких частотах — 12—25 МГц (декаметровые волны) — ведутся в РИАНе, а в 1977 г. исследования радиоизлучения пульсаров были начаты и в ИКИ АН СССР. Для расширения экспериментальных возможностей советские радиоастрономы эффективно используют международную кооперацию с Радиоастрономической обсерваторией Джодрелл-Бэнк Манчестерского университета (Великобритания), Институтом радиоастрономии общества Макса Планка (ФРГ) и Тасманийским университетом (Австралия).

Уже в 1968 г. Ю.И. Алексеевым, В.В. Виткевичем, В.Ф. Журавлевым и Ю.П. Шитовым был обнаружен новый, тринадцатый по счету в мире пульсар РР 0943 ("пущинский пульсар" с прямым восхождением $9^{\text{h}}43^{\text{m}}$) [62]. Отличительной особенностью этого пульсара оказались

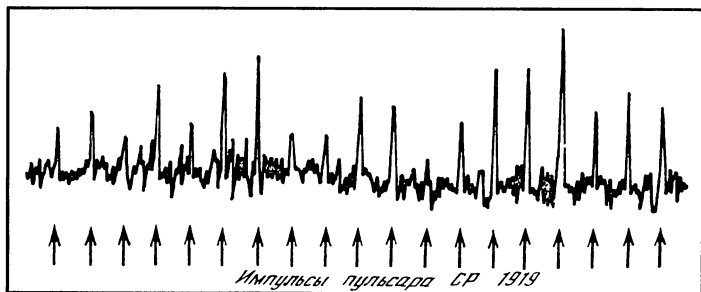


Рис. 1.2. Пример записи пульсара СР 1919 на радиотелескопе ДКР-1000 ФИАН ($\nu = 72,7$ МГц)

длительные интервалы "выключения" радиоизлучения. Значительные вариации интенсивности от импульса к импульсу были зарегистрированы и у других пульсаров [63]. Показано, что вариации обусловлены главным образом самим пульсаром, а не мерцаниями в межзвездной среде, как полагали в то время многие исследователи.

В.А. Удальцовым и В.Н. Злобиным обнаружено узкополосное спорадическое радиоизлучение, проявляющееся в резком возрастании интенсивности отдельных импульсов в узкой полосе частот [64]. Здесь следует остановиться на развитии общих представлений о пульсарах. Сразу же после открытия этих космических источников радиоизлучения остро встал вопрос об их природе. Короткая (десятки миллисекунд) продолжительность импульсов указывала на малый размер источника радиоизлучения, соизмеримый (или даже меньший) с размерами планет.

Возможными кандидатами в пульсары могли быть белые карлики или гипотетические нейтронные звезды, возможность существования которых была указана Л.Д. Ландау, У. Бааде, Ф. Цвикки еще в 30-е годы.

Астрономии известны два механизма регулярной периодичности: пульсации звезд и вращения звезд. Соответственно первоначально были предложены две модели пульсаров: пульсирующая, основанная на радиальных колебаниях звезды, и вращательная, основанная на вращении звезды, на которой имеется локальная область, обладающая направленным радиоизлучением. Какой же из указанных механизмов "работает" в пульсарах?

Значительный вклад в решение этого вопроса внес Виткевич, который с самого начала и последовательно отстаивал вращательную модель. Уже в наблюдениях первого пульсара СР 1919 он обратил внимание на своеобразное изменение интенсивности последовательных импульсов — быстрый подъем и медленный спад, характерный для вспыхивающего источника на вращающейся звезде [63].

Теоретическое обоснование существования быстровращающихся нейтронных звезд с очень сильными магнитными полями было высказано Н.С. Кардашевым еще в 1964 г. [65], т.е. за 3 года до открытия пульсаров.

Утверждение вращающейся модели поставило вопрос о том, что же представляет собой радиоизлучающая область и каков механизм радиоизлучения, обеспечивающий очень высокие ($\geq 10^{30}$ К) яркостные температуры излучения.

Примерно одинаково обоснованными и соответствующими имеющимся экспериментальным данным представлялись две модели: модель полого конуса и модель релятивистского формирования диаграммы направленности излучения [66]. В первой из них радиоизлучение является излучением кривизны релятивистских частиц, вытекающих из нейтронной звезды около ее магнитных полюсов в пределах конуса, открытых силовых линий. Направленность излучения пульсара определяется направленностью излучения самих частиц. Во второй модели излучающая область находится непосредственно вблизи светового цилиндра, и направленность излучения пульсара определяется релятивистским движением всей излучающей области.

Еще одна модель, основанная на мазерном механизме излучения, была предложена В.Л. Гинзбургом, В.В. Железняковым и В.В. Зайцевым [67].

Для выбора модели области радиоизлучения большое значение имеют исследования наблюдаемых параметров импульсов в широком диапазоне частот.

Как уже указывалось, индивидуальные импульсы радиоизлучения пульсаров имеют значительные вариации. Стабильной характеристикой пульсаров, определяющей свойства области излучения, являются так называемые средние профили, получаемые усреднением большого числа индивидуальных импульсов.

В.А. Извековой, А.Д. Кузьминым, В.М. Малофеевым и Ю.П. Шитовым проведены измерения и анализ средних профилей большого числа пульсаров на низких частотах [68]. Анализ полученных данных в сопоставлении с результатами измерений на высоких частотах показал в основном хорошее соответствие эксперимента модели полого конуса [69]. Вместе с тем выявлены и существенные отличия. В модели полого конуса с дипольным магнитным полем следовало ожидать, что после исключения дисперсионного запаздывания в межзвездной среде импульсы будут наблюдаться одновременно на всех частотах.

Измерение пульсара PSR 0809 + 74 на частотах 40, 60, 90 и 102 МГц (РАС ФИАН с участием ИКИ), 408 и 1420 МГц (Радиоастрономическая обсерватория Джодрелл-Бэнк, Великобритания) и 1720 МГц (Институт радиоастрономии Макса Планка, ФРГ) с единой временной привязкой [70, 71] показало, что на частотах 100 МГц—1 ГГц импульсы наблюдаются практически одновременно. Однако на более высоких частотах импульсы появляются раньше. На частоте 1,4 ГГц это опрежение составляет более 10 мс. Дана интерпретация этого эффекта как изгиб полого конуса излучения в нижней магнитосфере пульсара, обусловленный наличием, кроме дипольной, также квадрупольной составляющей магнитного поля [71].

Для проверки этого вывода на РАС ФИАН и в Институте радиоастрономии Макса Планка были проведены измерения временных

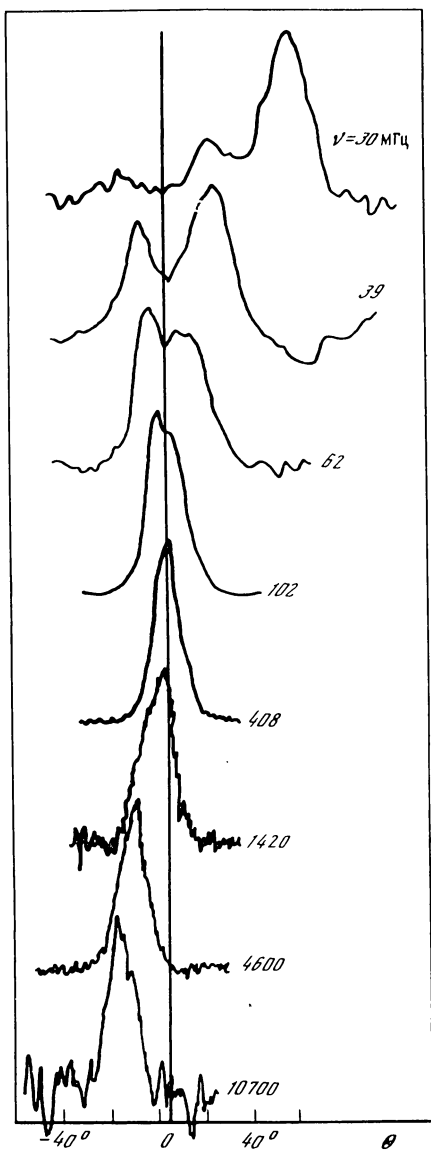


Рис. 1.3. Изменение долготы θ среднего профиля импульса пульсара PSR 0809+74 с частотой

положений импульсов этого пульсара на еще более высоких частотах — 4,6 и 10,7 ГГц [72]. Подтвержден эффект временного смещения импульсов и показано его увеличение с ростом частоты (рис. 1.3). Тем самым предположение об отклонении структуры магнитного поля пульсара от дипольного, а вместе с ним и основные положения модели полого конуса нашли веское подтверждение.

Показано, что двухкомпонентное (дипольное+квадрупольное) магнитное поле может объяснить также и такие наблюдаемые свойства радиоизлучения пульсаров, как увеличение крутизны энергетических спектров на высоких частотах и изменение характера частотной зависимости ширины средних импульсов.

Весьма плодотворными оказались результаты временной привязки средних профилей импульсов на низких частотах, выполненных на РАС ФИАНа [71]. У пульсара PSR 0809+74 было обнаружено дополнительное сверхдисперсионное запаздывание (или, что то же, увеличение долготы) импульса на частоте 39 МГц (см. рис. 1.3). Предложена интерпретация этого запаздывания скручиванием магнитных силовых линий в верхней магнитосфере пульсара

реакцией вращения. Подробно этот эффект рассмотрен Ю.П. Шитовым [73], показавшим, что "сверхдисперсионное запаздывание" должно наблюдаться на частотах, которые излучаются из области магнитосферы, близкой к "световому цилиндру".

Последующие измерения, проведенные на частотах 30—40 МГц [74], показали еще большее сверхдисперсионное запаздывание, подтвердив гипотезу скручивания магнитных силовых линий в верхней магнитосфере пульсара. Наблюдения пульсара PSR 0809+74 на еще более низких частотах (в диапазоне дециметровых волн), проведенные в

РИАНе УССР с временной привязкой к наблюдениям в метровом диапазоне на РАС ФИАН, выявили сверхдисперсионное запаздывание на всех частотах измерений вплоть до 16 МГц [75].

Пульсар PSR 0809+74 оказался не уникальным, а скорее типичным представителем объектов этого класса. Отклонения магнитных силовых линий от дипольной структуры как в нижней магнитосфере (отклонения времени прихода импульсов на высоких частотах), так и во внешних ее областях (низкочастотное сверхдисперсионное запаздывание) были обнаружены у ряда других пульсаров [72, 76].

В модели полого конуса излучение ограничено конусом открытых силовых линий, который определяет ширину импульса излучения. Вне импульса в этой модели излучение должно отсутствовать. В этой связи большой интерес представляет обнаруженное Ю.М. Бруком и Б.Ю. Устименко внеимпульсное радиоизлучение пульсаров на декаметровых волнах (10—25 МГц) [77, 78]. Характерной особенностью этого излучения является наличие протяженного компонента, примыкающего к главному импульсу. Этот компонент в ряде случаев занимает почти весь период, а его интенсивность растет по мере снижения частоты, так что энергия протяженного компонента может превышать энергию в главном импульсе.

Наличие внеимпульсного излучения, по-видимому, свидетельствует о том, что излучение этих частот образуется в областях магнитосферы пульсаров, близких к световому цилиндру, где магнитное поле уже недостаточно удерживает потоки излучающих частиц, имеющих поэтому возможность выходить за пределы конуса открытых силовых линий.

Исследования внеимпульсного излучения на метровых волнах ($\nu = 102$ и 60 МГц) проведены Т.В. Смирновой и Т.В. Шабановой [69]. Межимпульсное излучение обнаружено у ряда пульсаров. Энергия его составляет от 2 до 19% энергии главного импульса. Распределение по долготе на частотах 102 и 60 МГц одинаково.

С.А. Сулеймановой, Ю.В. Володиным и Ю.П. Шитовым проведены измерения поляризации ряда пульсаров на метровых волнах [79], которые показали, что степень поляризации растет с понижением частоты.

Индивидуальные импульсы пульсаров состоят из одного или нескольких субимпульсов. Оказалось, что у некоторых пульсаров наблюдается повторяющееся регулярное смещение — дрейф субимпульсов в среднем профиле. На РАС ФИАН обнаружены пульсары с очень регулярным дрейфом, повторяющимся в течение тысяч индивидуальных импульсов PSR 0809+74 [69] и PSR 0320+39 [80]. Противоположные направления дрейфа этих пульсаров свидетельствуют в пользу модели движения дрейфующих областей в конусе излучения.

Субимпульсы, в свою очередь, состоят из большого числа очень коротких импульсов, отражающих так называемую микроструктуру. Детальный анализ микроструктуры импульсов пульсаров на метровых волнах проведен Н.С. Кардашевым, А.Д. Кузьминым, О.А. Кузьминым, М.В. Поповым, Т.В. Смирновой, В.А. Согласновым и Ю.П. Шитовым в совместных работах ФИАН и ИКИ [81—83]. Выявлено,

что миллисекундная структура широкополосна, а микросекундная — узкополосна. Обнаружено одновременное сосуществование двух квазипериодичностей микроструктуры разных временных масштабов.

В исследовании пульсаров, как и при изучении других астрономических объектов, значительное место отводится проблемам, связанным с их эволюцией.

Совместными усилиями советских (РАС ФИАН, РИАН УССР) и английских (Джодрелл-Бэнк) радиоастрономов выполнены детальные исследования спектров многих пульсаров в диапазоне 17—1420 МГц [84]. Эти наблюдения показали, что, несмотря на значительные изменения спектров от импульса к импульсу, усредненный спектр индивидуальных импульсов эквивалентен спектру усредненных профилей, и потому для изучения средних спектров можно использовать и результаты неодновременных наблюдений. Было установлено, что одной из характерных особенностей спектров радиоизлучения пульсаров является низкочастотный "завал". Предложено несколько механизмов объяснения этого "завала". И.Ф. Малов [84] предложил механизм самопоглощения излучения. А.Д. Кузьмин и А.Г. Соловьев на основе численного моделирования показали, что низкочастотный "завал" с неизбежностью должен иметь место из-за геометрической расходимости пучков излучающих частиц при движении вдоль расходящихся силовых линий магнитного поля по мере удаления от поверхности нейтронной звезды [85]. Еще одну модель, объясняющую низкочастотное поглощение, предложили Ю.П. Очелков и В.В. Усов [86]. Они рассмотрели реабсорбцию излучения кривизны самими излучающими сгустками плазмы.

В.М. Малюфеев проанализировал связь между основными параметрами спектра пульсара и периодом. Оказалось, что чем больше период пульсара P , тем в среднем ниже частоты, характеризующие низкочастотный "завал" и высокочастотный "излом" в его спектре [84]. Другими словами, в ходе эволюции пульсара по мере замедления его вращения спектр пульсара смещается в область низких частот (рис. 1.4).

В.С. Бескин, А.В. Гуревич и Я.Н. Истомин рассмотрели модель пульсара, в которой замедление его вращения обусловлено токовыми потерями в магнитосфере [87], и показали, что в этой модели в ходе эволюции такого пульсара должно происходить увеличение угла между его магнитной осью и осью вращения. Однако, согласно экспериментальным данным [88], этот угол скорее уменьшается со временем, что свидетельствует в пользу механизма потерь на излучение.

И.Ф. Маловым развиты представления о наличии двух типов пульсаров, соответствующих моделям полого конуса и релятивистского формирования излучения. Проведена классификация пульсаров по совокупности наблюдаемых параметров и показано, что основным параметром, определяющим тип пульсара, является период [69].

А.Д. Кузьминым и А.Г. Соловьевым проведено моделирование формы среднего профиля, его изменения с частотой и частотно-энергетического спектра радиоизлучения пульсаров в рамках модели

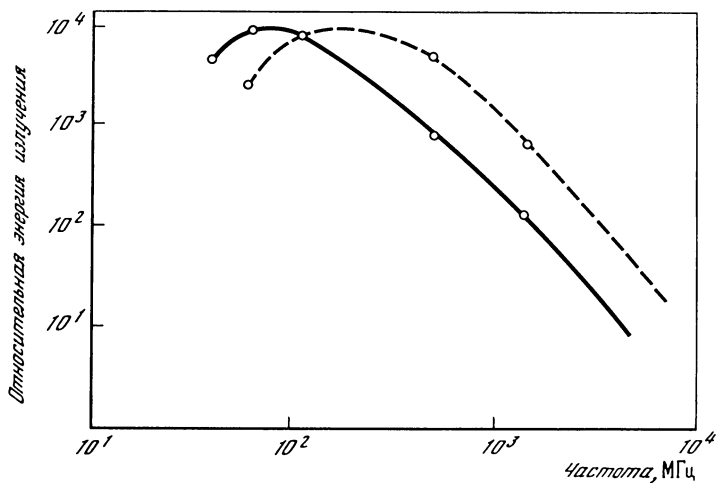


Рис. 1.4. Смещение усредненного спектра пульсаров с изменением периода пульсара P
 Сплошная кривая — $P > 1$ с; штриховая — $P < 1$ с

полого конуса и излучения кривизны [85]. Показано, что для лучшего соответствия наблюдаемым параметрам радиоизлучения пульсаров излучающие частицы должны быть немонотонноэнергетическими. Хорошее согласие с наблюдениями дает модель со степенным энергетическим спектром излучающих частиц $N(\gamma) \propto \gamma^{-\kappa}$ с показателем спектра $\kappa = 4$.

Уже в первых работах, посвященных исследованиям пульсаров (см., например, [63]), подчеркивалась важность этих источников радиоизлучения для зондирования межзвездной среды. И действительно, чрезвычайно малые угловые размеры, импульсный характер и линейная поляризация их радиоизлучения позволяют оценивать из наблюдений пульсаров и интегральные характеристики межзвездной среды на луче зрения (такие, как мера дисперсии и мера вращения), и основные параметры неоднородной структуры межзвездной плазмы (см., например, [89]).

Заметим, наконец, что высокая регулярность следования импульсов радиоизлучения пульсаров дала основание предложить новую пульсарную шкалу времени [69]. Специально поставленные исследования, которые велись на РАС ФИАН с 1978 г., позволили выбрать наиболее подходящие для введения такой шкалы пульсары, обладающие наименьшими остаточными отклонениями моментов прихода импульсов. Было установлено, что пульсарная шкала времени является долгоживущей, сравнительно легко воспроизводимой, обеспечивает практическую возможность привязки стандартов времени, находящихся сколь угодно далеко друг от друга. Точность пульсарной шкалы времени на длительных интервалах (> 1 года) может быть сравнима или даже выше точности существующих атомных шкал времени.

1.5. ЦЕНТР ГАЛАКТИКИ

Область центра Галактики уже давно привлекает внимание астрофизиков. Однако очень сильное межзвездное поглощение исключает возможность исследований этой области в классическом оптическом диапазоне волн, и лишь с наступлением эры радиоастрономии открылся первый канал информации об этой, пожалуй, наиболее интересной области нашей звездной системы.

Впервые наблюдения радиоизлучения центра Галактики были выполнены у нас в стране в 1959 г. на БПР. С использованием рекордно высокого для того времени углового разрешения по одной из координат были получены одномерные распределения яркости области центра Галактики на волнах 3,2, 9,4 и 33,3 см [25, 90]. Чуть позднее такие же наблюдения были проведены и на волне 21 см в непрерывном спектре и в линии водорода [91]. Полученные кривые прохождения этой области через диаграмму направленности радиотелескопа позволили выделить несколько деталей различных размеров. Несомненно, важнейшими результатами этой работы являлись выделение в центре Галактики радиоисточника относительно малых ($\sim 8,5$ пк) размеров и вывод о тепловой в основном природе его излучения.

В начале 70-х годов наблюдения центра Галактики были проведены на РАС ФИАН [92, 93]. Наблюдения на волне 8 мм, выполненные на радиотелескопе РТ-22 ФИАН впервые в столь коротковолновом диапазоне волн, позволили отделить излучение теплового радиоисточника в центре Галактики Sgr A(W) от расположенного в $3,5'$ от него нетеплового источника Sgr A(E), который как полагают в настоящее время большинство специалистов, представляет собой остаток вспышки сверхновой вблизи центра Галактики. Наблюдения на шести частотах в диапазоне 83—120 МГц были выполнены на радиотелескопе ДКР-1000 ФИАН. Они позволили получить стрип-распределение яркости области центра Галактики с разрешением $\sim 10'$ по прямому восхождению. На этих записях в непосредственной окрестности центра Галактики было выделено три нетепловых радиоисточника. В то же время излучение самого центрального радиоисточника Sgr A не было обнаружено, из чего был сделан вывод, что область центра Галактики окружает большое облако ионизованного водорода, которое должно иметь оптическую толщину $\tau = 1$ на частоте $\nu = 200$ МГц.

Во второй половине 70-х годов под руководством Ю.Н. Парийского были выполнены наблюдения центра Галактики на радиотелескопе РАТАН-600. В работе [94] сообщались результаты наблюдений на волнах 2,08, 3,9 и 6,52 см (рис. 1.5); позднее были выполнены наблюдения и на волне 1,38 см [95]. Высокое угловое разрешение радиотелескопа давало возможность отождествить отдельные детали распределения яркости с источниками, выделяемыми в этой области по наблюдениям на системах апертурного синтеза. В то же время были обнаружены несколько относительно протяженных компонентов радиоизлучения, незаметных или существенно подавленных на картах, построенных методом апертурного синтеза. Так обстоит дело с так называемой спиральной структурой в окрестностях компактного источ-

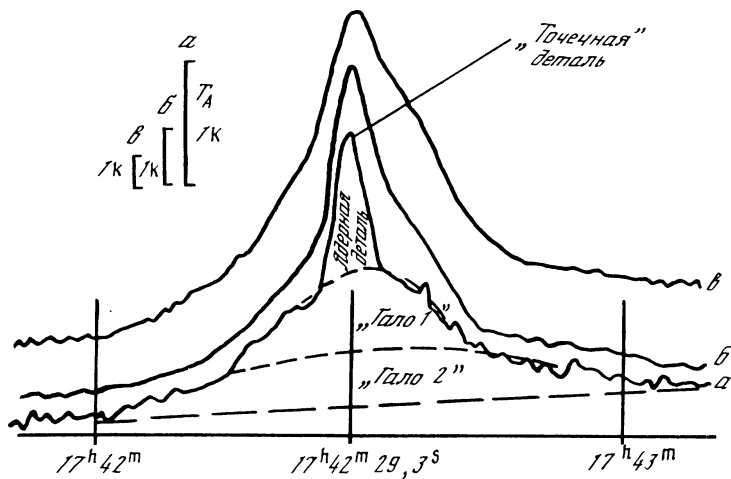


Рис. 1.5. Кривые прохождения радиоисточника Стрелец А через диаграмму направленности радиотелескопа РАТАН-600 на волнах 2,08 (а), 3,9 (б) и 6,52 см (в) [64]

Штриховыми линиями выделены детали: "ядерный" источник, "гало 1" и "гало 2"

ника Sgr A*. Помимо нетеплового радиоисточника Sgr A(E) размером $\sim 3'$, выделено более протяженное ($\sim 7'$) "гало" с центром, совпадающим с положением компактного радиоисточника. Еще раз был подтвержден "плоский" характер спектра Sgr A(W), но в то же время отмечена и очень высокая яркостная температура в центре этого источника. По наблюдениям в трех азимутах была установлена вытянутость Sgr A(W) (3:1) и наклон большой оси источника к плоскости Галактики в картинной плоскости на 23° [96].

Как известно, нашу Галактику нельзя отнести к числу активных галактик, и ситуация в ее ядре скорее должна быть типичной для большинства массивных спиральных галактик. Тем не менее пристальный анализ данных об излучении области центра Галактики в самом широком диапазоне электромагнитных волн — от радиоволн до гамма-излучения — свидетельствует, что в самом ядре нашей Галактики тоже постоянно происходит энерговыделение, пусть даже и не со столь громадной, как в активных ядрах, но все же с заметной ($\sim 10^{34}$ Вт) мощностью. Не исключено, что нынешняя ситуация в ядре Галактики не всегда сохраняется и бывают периоды большей его активности.

Вопрос о природе источника энергии, обычно связываемого с чрезвычайно компактным радиоисточником Sgr A* (расположенным внутри теплового радиоисточника Sgr A(W)), очень актуален. Измерения углового размера Sgr A* на нескольких длинах волн, выполненные за рубежом на интерферометрах со сверхдлинными базами, обнаружили зависимость видимого углового размера источника от частоты, которая неплохо согласуется с предположением о рассеянии его излучения на электронных неоднородностях межзвездной среды. Как было показано в работах Л.М. Озерного и В.И. Шишова [97, 98], это рассеяние

должно происходить в ближайшей окрестности (≤ 10 пк) ядра, и истинные размеры источника, по-видимому, не более 10^{14} см.

Но что же представляет собой этот компактный объект и можно ли им объяснить не только энерговыделение, но и все прочие особенности "центрального парсека" нашей Галактики? Эти вопросы не раз обсуждались, в том числе и в работах советских астрофизиков. По мере накопления новых данных предлагавшиеся ранее модели претерпевали изменения. В последнее время все чаще рассматриваются ситуации, когда в ядре Галактики располагается двойной массивный объект (с массами компонентов от $3 \cdot 10^2$ до $\sim 10^6 M_\odot$).

В одной из первых моделей этого класса, предложенной Н.С. Кардашевым [99], компактный радиоисточник Sgr A* связывался с одной из двух черных дыр с массами $\sim 10^6 M_\odot$, расположенными на расстоянии $\sim 0,1$ пк одна от другой и составляющими двойную систему. В качестве альтернативы в той же работе рассматривался вариант, когда второй компонент двойной системы представлял собой тесное звездное скопление, центр тяжести которого отстоит от черной дыры на то же расстояние. Предполагалось также, что релятивистский электронно-позитронный пучок может генерироваться вдоль оси вращения отождествляемой с радиоисточником черной дыры внутри воронки аккреционного диска. Не исключено, что энергия частиц определяется балансом между их ускорением, электрическим полем и потерями на синхротронное излучение и обратный комптон-эффект. При этом синхротронное излучение подобного квазимонохроматического пучка обладало бы в радиодиапазоне спектральным индексом $\alpha = -1/3$ (т.е. $S \approx \nu^{1/3}$), что неплохо соответствовало бы наблюдениям ($\alpha_{\text{набл}} = -0,08 \div -0,55$).

Другие варианты модели ядра Галактики в виде двойной системы предлагались в работах [100, 101]. К сожалению, пока еще нет возможности однозначно выбрать лучшую из моделей, а именно такую, которая непринужденно объясняла бы не только радиоданные, но и весь богатый набор имеющихся сведений о центре Галактики, получаемых также в инфракрасном, рентгеновском и гамма-диапазонах.

1.6. ВНЕГАЛАКТИЧЕСКАЯ РАДИОАСТРОНОМИЯ

Первые отождествления и гипотезы. Решение наблюдательных задач внегалактической радиоастрономии предъявляет, пожалуй, наиболее жесткие требования к используемым для этих целей инструментам. Неудивительно поэтому, что некоторое отставание отечественной экспериментальной базы в первые послевоенные годы привело к тому, что наблюдения внегалактических радиоисточников в этот период ограничивалось у нас лишь измерениями интегральных плотностей потоков двух наиболее мощных объектов этого типа, а именно радиоисточников Лебедь А и Дева А (см., например, сообщение В.А. Санамяна в [22]). Тем более заслуживают внимания работы, выполненные в эти годы ведущими советскими астрофизиками по интерпретации наблюдений зарубежных авторов.

К началу 50-х годов постепенно стало выясняться, что подавляю-

щее большинство дискретных источников радиоизлучения, или, как их тогда называли, "радиозвезд", представляет собой объекты внегалактические. Очень веские аргументы против истинно "радиозвездной гипотезы" и в пользу внегалактической природы космических источников радиоизлучения были высказаны Шкловским в 1952 г. в уже цитировавшейся работе [2]. В следующем, 1953 г. вышла в свет другая, не менее важная его статья [102]. Остановливаясь на вопросе о природе внегалактических источников радиоизлучения, Шкловский обратил внимание на то, что сравнительно небольшая их часть должна отождествляться с обычными спиральными галактиками, подобными нашей Галактике или туманности Андромеды. Что же касается подавляющего большинства других внегалактических радиоисточников, то они должны обладать в тысячи, и даже в миллионы раз более высокой радиосветимостью, за что Шкловский и предложил называть их "радиогалактиками".

Число надежно отождествленных радиогалактик в то время было еще совсем невелико — это радиогалактики Персей А, Дева А и Центавр А. В 1952 г. Бааде и Минковский сообщили об отождествлении одного из самых мощных на небе источников радиоизлучения Лебедь А со слабой ($\sim 16,5^m$) "двойной" галактикой. Шкловский [102] совершенно справедливо высказал соображения о том, что сравнительно мощный радиоисточник Южного полушария — Печь А — следует отождествить с пекулярной галактикой NGC 1316.

После этих первых отождествлений острейшим образом встали вопросы о механизме радиоизлучения галактик, и в первую очередь радиогалактик, а также о причинах столь мощного энерговыделения. Выяснилось, что мощность излучения радиогалактик в радиодиапазоне зачастую заметно превосходит суммарную оптическую светимость всех составляющих эту галактику звезд.

Что касается механизма радиоизлучения галактик, то по крайней мере у нас в стране среди специалистов в этом отношении было практически полное единство взглядов. Синхротронный механизм к этому времени был уже очень популярен, поскольку удачно объяснял не только фоновое радиоизлучение Галактики, но и излучение радиоисточников, отождествляемых с остатками вспышек сверхновых звезд. Подобие спектров радиоизлучения галактических и внегалактических радиоисточников, естественно, наталкивало на мысль, что и в излучении большинства других галактик (в том числе и радиогалактик) синхротронный механизм радиоизлучения является доминирующим.

Гораздо сложнее обстояло дело с природой мощного источника энергии, необходимого для объяснения наблюдаемого радиоизлучения. Отождествив в 1952 г. самый яркий из внегалактических источников радиоизлучения Лебедь А со слабым двойным объектом, Бааде и Минковский высказали смелое предположение, что сверхмощное радиоизлучение этого объекта есть следствие столкновения двух гигантских галактик. Критически анализируя эту гипотезу, Шкловский [102] отмечал, что, хотя взаимодействие газовых составляющих и может в принципе привести к ускорению значительной части частиц до энер-

гии космических лучей, утверждение, что именно Лебедь А есть результат столкновения двух галактик, выглядит преждевременным.

Во-первых, возрастание яркости к центру двойной системы и близкие значения лучевых скоростей обеих ее частей свидетельствуют в пользу того, что это единый объект. Во-вторых, если аномально мощное излучение в оптических спектральных линиях этой системы объяснять, как это делали Бааде и Минковский, обычным разогревом межзвездного газа, то почему оно не сопровождается столь же резким возрастанием непрерывного оптического излучения. Обсуждая двойную структуру оптического изображения объекта, Шкловский высказал предположение, что ее вполне можно было бы объяснить наличием в галактике мощной пылевой полосы, подобной тем, что наблюдаются в радиогалактиках NGC 5128 (Центавр А) и NGC 1316 (Печь А).

Однако внешняя привлекательность гипотезы Бааде и Минковского, а в какой-то мере и отсутствие подходящей альтернативы все же сыграли свою роль — число ее сторонников быстро росло. Уже через год-два после отождествления радиоисточника Лебедь А она завоевала умы подавляющего большинства специалистов за рубежом. Справедливости ради заметим, что и Шкловский в нескольких последующих работах (см., например, [103]) склонился к той точке зрения, что радиогалактика Лебедь А, по-видимому, все же представляет собой сталкивающиеся галактики, соглашался, что примером более "слабого" столкновения является Персей А (NGC 1275), но возражал против подобного объяснения природы радиоизлучения NGC 1316, 4486 и 5128.

В 1955 г. впервые с изложением своих взглядов на природу радиогалактик выступил В.А. Амбарцумян (см. его доклад в сборнике [22]). Эти взгляды нашли свое развитие в последующих статьях и докладах Амбарцумяна [104] на симпозиумах, посвященных проблемам внегалактической астрономии.

Первый тезис, содержащийся в его работах, состоял в том, что гипотеза сталкивающихся галактик должна быть отвергнута хотя бы из чисто статистических соображений. Действительно, вероятность "лобового" столкновения, подобного тому, какое предполагалось в случае радиоисточника Лебедь А, как показал Амбарцумян, ничтожно мала. К тому же на одно такое "лобовое" столкновение двух гигантских галактик должно приходиться очень большое число столкновений с большими прицельными расстояниями и галактик меньших масс.

Второй тезис сводился к тому, что основные особенности радиогалактик, сейфертовских галактик и некоторых других пекулярных объектов из мира галактик связаны с активными процессами, протекающими в их ядрах. Такой взгляд на природу пекулярных внегалактических объектов довольно естественно вытекал из хорошо известной космогонической концепции Амбарцумяна при распространении последней на мир галактик. Далеко не все положения этой космогонической концепции, охватывающей самый широкий круг вопросов, нашли всеобщее признание специалистов, но в том, что каса-

ется самой постановки проблемы активности галактических ядер, значение работ Амбарцумяна, по-видимому, трудно переоценить.

Против объяснения мощного радиоизлучения столкновениями галактик выступал и Б.А. Воронцов-Вельяминов. Он высказал [105] сомнение в том, что такое объяснение было бы правильным даже в случае радиогалактики Лебедь А. Воронцов-Вельяминов обратил внимание на то, что обнаруженные им сотни действительно взаимопроникающих галактик не дают заметного радиоизлучения. Указывая на то, что радиогалактики, подобно сейфертовским галактикам, демонстрируют сильное излучение в линиях из области ядра, он впервые отметил корреляцию мощности радиоизлучения галактик с массой светящегося газа в их ядрах.

В середине 50-х годов появились и первые сенсационные результаты кембриджских подсчетов радиоисточников, свидетельствовавшие, что число источников по мере уменьшения их потоков растет куда быстрее, чем можно было ожидать в случае стационарной евклидовой вселенной. Анализируя этот результат, В.В. Виткевич пришел к заключению [105], что его никак нельзя объяснить какими-либо методическими ошибками или влиянием тех или иных эффектов, связанных с красным смещением спектров далеких радиогалактик. А значит, появившиеся сомнения в стационарности (или однородности) Вселенной вполне обоснованы. Он обратил внимание также на то, что в сложившейся ситуации крайне актуальным становятся измерения угловых размеров сотен и даже тысяч радиоисточников.

Исследования отдельных объектов; модели радиогалактик и квазаров. Первый важный результат по наблюдениям внегалактических радиоисточников у нас в стране был получен после введения в строй радиотелескопа РТ-22. Выше упоминалось о том, что в 1960 г. на этом радиотелескопе были проведены наблюдения десятков источников (в том числе и внегалактических) на волнах 9,6 и 3 см. Для многих из наблюдавшихся источников это были самые высокочастотные измерения, которые позволили существенно уточнить поведение их спектров в сантиметровом диапазоне волн.

Так, было надежно показано, что спектр радиогалактики Лебедь А на частотах $\nu > 1400$ МГц становится заметно круче и соответствующее изменение спектрального индекса составляет $\Delta\alpha \approx 0,5$ [106]. Используя этот факт, Н.С. Кардашев, А.Д. Кузьмин и С.И. Сыроватский попытались оценить возраст внегалактического радиоисточника по виду его радиоспектра. Они установили, что именно на величину 0,5 должен изменяться спектральный индекс синхротронного излучения, если релятивистские электроны поставляются в него с постоянной мощностью в течение времени t и при этом испытывают только потери на излучение. Частота излома в спектре источника ν_0 должна быть связана с его возрастом t соотношением

$$t \approx H_{\perp}^{-3/2} \nu_0^{-1}, \quad (1.2)$$

где H — напряженность магнитного поля в источнике. Принимая за напряженность магнитного поля в Лебеде А ее оценку, полученную из условия равнораспределения энергии между космическими лу-

чами и магнитным полем в области, откуда исходит радиоизлучение, авторы работы [106] нашли, что $t \approx 10^6$ лет. Тем самым было получено еще одно свидетельство относительной молодости радиогалактик.

В 1962 г. Кардашев рассмотрел более общую задачу об эволюции спектра источника синхротронного излучения с учетом зависимости темпа поставки релятивистских электронов от времени, возможных механизмов их ускорения и потерь (адиабатических, комптоновских и синхротронных) [59]. Результаты, полученные в этой, ставшей теперь уже классической работе, на протяжении вот уже четверти века используются всеми специалистами при анализе спектров источников синхротронного излучения.

Примерно в те же годы сотрудники отдела радиастрономии ГАО АН СССР успешно использовали достоинства своего инструмента, а именно относительно высокое и даже рекордное по состоянию на начало 60-х годов угловое разрешение БПР. По наблюдениям на БПР в эти годы были получены одномерные распределения яркости десятков внегалактических радиоисточников [107]. Запись прохождения радиогалактики Лебедь А через диаграмму направленности БПР впервые непосредственно указала на двухкомпонентную структуру этого радиоисточника и позволила измерить относительную интенсивность его главных компонентов. При этом выяснилось, что асимметрия источника противоположна той, которая следовала из модели Лебеда А, построенной Р. Дженнисоном (Англия) на основе его интерферометрических измерений. Между основными компонентами радиоисточника была обнаружена слабая перемычка — первое свидетельство связи каждого из компонентов с ядром галактики. Результаты измерений поляризации Лебеда А, выполненные в эти годы на БПР на многих частотах, использовались позднее специалистами при анализе различных моделей радиогалактик.

В середине 60-х годов были начаты исследования внегалактических источников радиоизлучения еще на двух крупных радиотелескопах — ДКР-1000 ФИАНа и Украинском Т-образном радиотелескопе УТР-1 РИАНа УССР (г. Харьков). Оба телескопа предоставляли большие возможности для исследования многих сотен радиоисточников в диапазонах метровых и дециметровых волн (см., например, [108, 109]).

После проведения первых больших серий наблюдений выяснилось прежде всего, что измеренные значения плотностей потоков радиоисточников оказываются систематически выше плотностей потоков тех же источников примерно на тех же частотах по данным зарубежных (главным образом английских, американских и канадских) авторов. Особенно значительным это расхождение было в дециметровом диапазоне, где соответствующий коэффициент пересчета плотностей потока из одной шкалы в другую составлял поначалу ~ 2 . Поиск истины в этом вопросе и согласование соответствующих шкал плотностей потоков потребовали значительных усилий нескольких радиоастрономических учреждений в мире и продолжались практически до начала 70-х годов. Здесь следует выделить большую и плодотворную работу харьковских радиоастрономов.

По завершении этой большой работы стало возможным прово-

доть уже количественное сопоставление спектров радиоисточников в очень широком интервале частот — по крайней мере от 10 МГц до 10 ГГц. Соответствующий анализ показал, что заметный процент радиогалактик и некоторые из компактных квазизвездных источников (квазаров) обладают спектрами с так называемой положительной кривизной, т.е. спектрами, которые с понижением частоты круче растут вверх. Более детальное рассмотрение структур и спектров нескольких наиболее изученных радиоисточников свидетельствует о том, что подобный радиоспектр внегалактического объекта практически безошибочно указывает на наличие в источнике протяженного компонента (размером ≥ 100 кпк) с крутым спектральным индексом.

Наблюдения на радиотелескопах ДКР-1000 и УТР-1 значительно дополнили и число источников с так называемыми низкочастотными завалами в спектрах. В середине 60-х годов появились также сообщения о том, что некоторые другие источники обладают аномальными ("инвертированными") спектрами на высоких частотах: плавное уменьшение плотности потока с ростом частоты в спектрах этих радиоисточников сменяется резким возрастанием, после чего плотность потока на значительном интервале частот остается примерно постоянной.

Анализ возможных механизмов возникновения спектров с низкочастотными завалами и инвертированных спектров приводил к тому, что наиболее вероятной причиной является синхротронное самопоглощение в источнике или в отдельном его компоненте, который оказывается доминирующим на самых высоких частотах. Частота, на которой источник синхротронного излучения становится оптически толстым, определяется его размером и физическими условиями в источнике. Предполагая равенство объемных плотностей энергии магнитного поля и релятивистских частиц, В.И. Слыш получил выражение, связывающее угловой размер радиоисточника θ с напряженностью магнитного поля и такими наблюдаемыми параметрами источника, как плотность потока на фиксированной частоте, спектральный индекс и характерная частота низкочастотного завала $\nu_{\max}[110]$:

$$\theta \approx S_{\nu_{\max}}^{0.5} \nu_{\max}^{-1.25} H_{\perp}^{0.25} (1+z)^{0.25}. \quad (1.3)$$

Поскольку θ зависит от напряженности магнитного поля очень слабо, эту формулу часто использовали для оценки угловых размеров радиоисточников по основным параметрам их спектров.

Постепенное накопление наблюдательных данных привело в конце концов и к новому этапу в разработке теоретических моделей внегалактических радиоисточников. В начале 60-х годов вышли в свет две работы Шкловского [111, 112], посвященные обсуждению природы радиогалактик. Окончательно отказавшись от гипотезы "сталкивающихся галактик", Шкловский сформулировал в этих работах основные положения так называемой плазмодной модели радиогалактик. Согласно этой модели, активные процессы в ядрах молодых гигантских эллиптических галактик приводят к однократным или рекуррентным выбросам из области ядра в двух противоположных направлениях

(вдоль оси вращения ядра) сгустков плазмы с замороженным в нее магнитным полем и релятивистскими частицами (эти сгустки были названы Шкловским плазмонами, теперь же такие образования чаще называют плазмоидами). Эволюция этих образований была рассмотрена в тех же упрощающих предположениях, что и эволюция молодых оболочечных остатков сверхновых [45]; другими словами, предполагалось, что энергия, заключенная в релятивистских компонентах плазмоида, расходуется только на его расширение и синхротронное излучение. Примечательно, что уже в этих работах Шкловский высказал мысль, что пополнение иссякающих запасов газа в ядре может происходить за счет аккреции межгалактического газа на массивную эллиптическую галактику, т.е. феномен радиогалактики может представлять собой "столкновение" гигантской Е-галактики с массивным облаком межгалактического газа.

Плазмоидная модель радиогалактик развивалась в дальнейшем и другими видными радиоастрономами. Вплоть до середины 70-х годов она оставалась самой популярной среди специалистов моделью радиогалактики. Наиболее полное описание достоинств и недостатков этой модели, выявившихся при интерпретации многочисленных наблюдательных данных, появившихся в 60—70-е годы, содержится в [113].

В работе [112] была предпринята одна из первых попыток анализа распределения радиогалактик на плоскости радиосветимость—характерный линейный размер. И хотя вывод о существовании двух последовательностей: "главной" и "последовательности гигантов", сделанный Шкловским на основе довольно скудных и не всегда верных наблюдательных данных, не получил в дальнейшем подтверждения, эта работа положила по сути начало поиску всевозможных корреляционных зависимостей между различными физическими характеристиками радиогалактик.

В тот период, когда еще отсутствовала хорошо разработанная гипотеза относительно природы этих объектов, анализ статистических закономерностей распределения радиогалактик по различным параметрам имел большое значение для выбора правильного направления исследований. Заметное место среди подобных работ заняли работы В.Н. Курильчика [114, 115]. Анализируя имевшиеся к концу 60-х годов данные о спектрах радиоизлучения внегалактических радиоисточников из каталога 3CR, он пришел к выводу, что первичный энергетический спектр инжектируемых частиц в этих объектах характеризуется показателем степени $\gamma_0 \approx 2,5$ (спектральный индекс излучения $\alpha_0 \approx 0,75$). Здесь следует заметить, что еще в 1961 г. Сыроватский [116] из чисто термодинамических соображений пришел к выводу, что именно такой энергетический спектр должен быть присущ релятивистским электронам, выходящим из области их генерации, если там выполняется условие равномерного распределения энергии между магнитным полем, релятивистскими частицами и турбулентными движениями.

В.Н. Курильчик показал также, что тип спектра радиоисточника коррелирует с его структурой и оптическими характеристиками объекта, с которым он отождествляется. Так, плоские ($\alpha \leq 0,5$) спектры ассоциируются с компактными деталями, которые чаще встречаются в

квазизвездных радиоисточниках. Возможную причину возникновения подобных плоских спектров автор справедливо видел в сложной структуре соответствующих компактных деталей, отдельные компоненты которых обладают спектрами с ярко выраженными эффектами синхротронной реабсорбции. Напротив, крутые спектры ($\alpha \geq 1,0$) в большей степени свойственны протяженным двойным радиоисточникам и структурам типа гало. Возраст этих образований должен быть достаточно большим, и большие значения их спектральных индексов вполне можно объяснить существенной ролью синхротронных и комптоновских потерь в источнике.

В 1965 г. была открыта новая страница истории внегалактической радиоастрономии. Именно тогда появилось первое сообщение Г.Б. Шоломицкого о наблюдавшейся им переменности радиоисточника СТА 102 [117]. Плотность потока этого квазара (красное смещение его было вскоре измерено и оказалось равным 1,037) на волне 31,3 см, по данным Шоломицкого, изменялась с августа 1964 г. по февраль 1965 г. с характерным периодом порядка 3,5 мес. и с амплитудой $\sim 30\%$. И хотя первые подозрения относительно того, не имеем ли мы в данном случае дело с сигналами искусственного происхождения, быстро рассеялись (см. гл. 7), интерес специалистов к этой работе не ослабевал. Действительно, несмотря на то что мысль о нестационарных процессах в мире внегалактических объектов уже постепенно овладевала умами астрофизиков, никто из них не ожидал, что существенные изменения в подобных масштабах могут происходить даже за десятки и сотни лет, а тем более за несколько месяцев.

Вполне естественно, что усилия многих радиоастрономов сразу же были направлены как на непосредственную проверку результатов Шоломицкого по СТА 102, так и на поиск переменности других внегалактических радиоисточников. Результаты не заставили долго ждать. Уже в том же 1965 г. У. Дент обнаружил на высоких частотах переменность потоков квазаров 3С 273, 279 и 345.

Одна из первых работ по анализу переменности нескольких внегалактических радиоисточников была выполнена по наблюдениям на радиотелескопе РТ-22 ФИАН. Эти наблюдения проводились в 1965—1969 гг. на волнах 5,2, 3,3 и 0,8 см [118, 119]. Основное внимание здесь было уделено объектам, в излучении которых на высоких частотах доминируют компактные детали, обнаруживающие эффект синхротронного самопоглощения уже на волнах ~ 5 —6 см. Переменность плотностей потоков квазаров 3С 279 и 345 по этим наблюдениям не вызвала сомнений, для квазара 3С 273 и радиогалактики 3С 84 о переменности можно было говорить с большой вероятностью. Интерпретация наблюдаемых вариаций потоков радиоисточников в рамках модели адиабатически расширяющегося плазмоида привела авторов работы [119] к выводу об очень молодом (порядка нескольких лет) возрасте этих образований. Впоследствии работа по измерению плотностей потоков большого числа внегалактических источников радиоизлучения на протяжении длительных интервалов времени была продолжена на радиотелескопе РТ-22 Крымской астрофизической обсерватории (КРАО).

Что же касается переменности радиоисточника СТА 102, то она была подтверждена значительно позднее. Характерная амплитуда переменности этого источника в настоящее время заметно меньше, чем указывалось в первых работах Шоломицкого, но не исключено, что это противоречие лишь кажущееся и переменность СТА 102 действительно носит вспыхивающий характер.

Обнаружение переменности внегалактических радиоисточников выдвинуло на повестку дня новые проблемы. Небольшой временной масштаб наблюдаемой переменности ($t \leq 1$ года) соответствует характерному линейному масштабу области излучения $ct \leq 0,3$ пк. Относя такой источник на расстояния, соответствующие красным смещениям квазаров ($z \geq 0,5$), можно получить оценку ожидаемого видимого размера источника $\theta < 10^{-4}$ с дуги. С другой стороны, используя приведенную выше формулу (1.3), справедливую для источников некогерентного синхротронного излучения, мы получим независимую оценку углового размера источника, которая, как правило, оказывается по крайней мере на порядок больше приведенного выше значения. Другими словами, яркостная температура таких радиоисточников должна превышать предельно возможную яркостную температуру источников некогерентного синхротронного излучения ($T_{\text{я}} \approx 10^{12}$ К), за которой катастрофически возрастают комптоновские потери излучающих электронов.

Таким образом, очень остро встал вопрос не только об источнике энергии в ядрах активных галактик и в квазарах, но и о способах преобразования этой энергии в радиоволны и другие формы электромагнитного излучения. Значительное внимание уделялось этим проблемам в работах В.Л. Гинзбурга, Л.М. Озерного и других сотрудников теоретического отдела ФИАН (см., например, [120—122]). Ими было рассмотрены конкретные схемы формирования в ядрах галактик массивных магнитоплазменных тел (магнитоидов), которые, как было показано, способны играть роль "центральных машин", перерабатывающих гравитационную энергию в энергию магнитного поля и релятивистских частиц. Были рассмотрены и вопросы развития неустойчивостей в магнитосфере быстро вращающегося магнитоида, которыми, как оказалось, можно объяснить многие особенности и переменность радиоизлучения квазаров и активных ядер галактик.

В работах Л.М. Озерного и В.Н. Сазонова [123, 124] впервые были подробно рассмотрены различные релятивистские эффекты, которые должны наблюдаться в расширяющихся или разлетающихся со скоростью, близкой к скорости света, источниках синхротронного излучения. Актуальность этих исследований стала тем более очевидной в настоящее время, когда выяснилось, что с релятивистскими скоростями крупномасштабных движений мы сталкиваемся во многих (если не во всех) активных ядрах галактик.

Упомянутое выше противоречие между размерами излучающих областей квазаров, оцениваемыми по характерному временному масштабу переменности и по спектру их радиоизлучения, поставило трудную задачу и перед наблюдательной радиоастрономией, а именно задачу непосредственного измерения угловых размеров этих радиоисточников.

Было совершенно очевидно, что ее решение требует повышения угловой разрешающей способности существовавших в то время радиотелескопов по крайней мере на 3—4 порядка, а значит, создания антенных сооружений или систем с размерами в тысячи километров.

Возможности создания подобных систем с использованием магнитных записей сигналов, получаемых независимо на сильно разнесенных радиотелескопах, была посвящена работа Л.И. Матвеевко, Н.С. Кардашева и Г.Б. Шоломицкого [125]. Однако техническая реализация этой изящной идеи у нас в стране несколько затянулась, и первые интерферометрические системы, работающие по принципу независимой регистрации сигналов в разных пунктах, были созданы в Канаде и США. И все же в конце 60-х годов в значительной степени благодаря усилиям В.В. Виткевича и Л.И. Матвеевко были проведены первые совместные советско-американские наблюдения на радиointерферометре Крым—Грин-Бэнк, обеспечившие рекордное угловое разрешение порядка долей миллисекунд дуги [126].

С тех пор сотрудниками ИКИ АН СССР, где была сформирована специальная лаборатория под руководством Л.И. Матвеевко, и КРАО было выполнено много работ по наблюдениям внегалактических радиоисточников в рамках европейской и глобальной сети радиointерферометров. Подобные наблюдения, как известно, позволили измерить не только угловые размеры отдельных компонентов компактных радиоисточников и расстояния между ними, но и проследить за изменениями в структуре этих источников, расположенных в ядрах активных галактик и в квазарах. Заметную роль в этих исследованиях сыграли измерения динамических спектров переменных радиоисточников, которые проводились на РАТАН-600 параллельно с наблюдениями на интерферометрах со сверхдлинными базами по так называемой программе спектр—структура. Во многих случаях выявились эффекты релятивистских разлетов отдельных компонентов, которыми, в частности, и объясняются сегодня аномально высокие яркостные температуры, измеряемые в системе отсчета наблюдателя, и снимаются противоречия в оценках размеров радиоизлучающих областей, полученных различными методами.

Некоторые астрофизики, однако, придерживаются той точки зрения, что модели компактных радиоисточников в ядрах галактик, включающие крупномасштабные релятивистские движения отдельных компонентов, все еще приводят к значительным трудностям. В качестве альтернативы они предлагают в большинстве случаев модели, основанные на "эффекте прожектора" (см., например, [127]), когда расположенный в ядре галактики источник возбуждает излучение каких-либо облаков, находящихся на значительном расстоянии от него, что приводит к кажущемуся перемещению источника излучения со скоростями, большими скорости света. Быстрый прогресс наблюдательной радиоастрономии позволит, по-видимому, уже в ближайшие годы сделать окончательный выбор между этими двумя группами моделей компактных источников в ядрах галактик.

Каталоги и подсчеты радиоисточников; другие статистические исследования. В радиоастрономии, как, впрочем, и в других областях

астрономии, особое место занимают работы по составлению каталогов радиоисточников, обширные и глубокие обзоры неба. Результаты таких работ служат фундаментом для всех без исключения статистических исследований и в большинстве своем сохраняют ценность на протяжении многих десятков лет.

Первые отечественные каталоги, составленные по наблюдениям на радиотелескопах РТ-22 ФИАН и БПР, включали главным образом галактические источники радиоизлучения. Наблюдения большого числа внегалактических радиоисточников стали возможны, как уже отмечалось, только с введением в строй радиотелескопов УТР-1 и ДКР-1000 [108, 109].

По измерениям плотностей потоков около 500 радиоисточников на частоте 86 МГц, выполненным на радиотелескопе ДКР-1000 ФИАН, было установлено, что спектральные индексы внегалактических источников радиоизлучения в дециметровом и метровом диапазонах в среднем увеличиваются по мере уменьшения плотностей потоков, по крайней мере вплоть до $S_{178} \approx 10$ Ян ($1 \text{ Ян} = 10^{-26} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{Гц})$). Более детальный анализ показал, что этот эффект практически полностью обусловлен квазарами. Среди наиболее удаленных ($z \geq 1$) квазаров из низкочастотных выборок радиоисточников практически никогда не встречаются объекты со спектральными индексами $\alpha < 0,8$ [128, 129]. Исследования зарубежных радиоастрономов, выполненные в последние годы, полностью подтвердили указанную космологическую эволюцию спектральных индексов внегалактических радиоисточников и позволили проанализировать зависимость $\alpha(S)$ в области значительно более слабых плотностей потоков.

В 70-е годы отечественная экспериментальная база радиоастрономии пополнилась радиотелескопами нового поколения. В эти годы вступили в строй радиотелескопы УТР-2 (1972 г., РИАН УССР), БСА (1974 г., ФИАН) и РАТАН-600 (1974 г., САО АН СССР); с 1972 г. были начаты наблюдения по научной программе и на радиointерферометре ФИАН метрового диапазона с переменной базой.

Главной научной программой, и сегодня ведущейся на радиотелескопе УТР-2, является обзор неба на нескольких длинах волн декаметрового диапазона. К настоящему времени этот обзор выполнен уже для нескольких участков неба со склонениями $\delta > -13^\circ$ и общей площадью около 4 ср. Составлен самый большой в декаметровом диапазоне каталог, включающий свыше 1300 радиоисточников в большинстве своем с плотностями потоков $S_{25} \gtrsim 20$ Ян на частоте 25 МГц [130].

Используя этот каталог, а также полученные при проведении обзора данные о распределении флуктуаций, обусловленных эффектом "путаницы", К.П. Соколов проанализировал зависимость число источников—плотность потока на частоте 25 МГц [131, 132]. Заметим, что, после того как между кривыми подсчетов на разных частотах было обнаружено заметное различие и было установлено, что в обзорах на низких частотах процент источников, находящихся на космологических расстояниях, выше, интерес к подсчетам радиоисточников на низких частотах значительно возрос.

Соколову удалось показать, что в интервале плотностей потоков

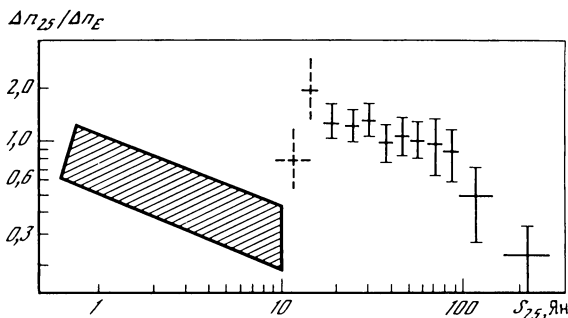


Рис. 1.6. Результирующая зависимость $\Delta n_{25}(S)/n_E(S)$ на частоте 25 МГц (по данным работы [132])

Пунктир — точки с большей статистической неопределенностью; заштрихованный участок диаграммы соответствует области возможных положений кривой подсчета при малых значениях S_{25} , определенной из анализа эффекта "путаницы"

$S_{25} = 10 \div 20$ Ян в дифференциальной кривой подсчетов наблюдается резкий завал, который невозможно объяснить, не предполагая резкого уменьшения пространственной плотности мощных внегалактических радиоисточников на достаточно больших красных смещениях ($z_{\max} > 3$). При дальнейшем уменьшении плотностей потоков дифференциальная кривая подсчетов вновь начинает расти, обнаруживая тем самым появление среди слабых источников новой популяции внегалактических объектов со светимостями, промежуточными между радиогалактиками и нормальными галактиками типа нашей Галактики или туманности Андромеды (рис. 1.6.).

Высокочувствительные обзоры нескольких участков неба выполнены и на радиотелескопе РАТАН-600, но уже в диапазоне сантиметровых волн. Рассчитанную на многие годы программу обзора всего неба на нескольких волнах сантиметрового диапазона ($\lambda = 2; 3,5$ и 8 см) на этом радиотелескопе ведет с 1978 г. группа сотрудников ГАИШ (М.Г. Ларионов, А.Г. Горшков, В.Р. Амирханян и др.). Каталог, который составляется по материалам этих наблюдений, уже сейчас включает несколько тысяч радиоисточников, и притом каждый второй из них — это новый источник.

В 80-е годы с использованием высокочувствительного радиометра для волны 7,6 см (и несколько менее чувствительных радиометров для других волн сантиметрового диапазона) на РАТАН-600 под руководством Ю.Н. Парийского и Д.В. Королькова было проведено два больших цикла круглосуточных ($\alpha = 0 \div 24^h$) наблюдений полосы неба шириной $\pm 10'$ относительно склонения пекулярного галактического радиоисточника SS 433. Наиболее полное изложение результатов этих циклов (так называемых программ "Холод-1" и "Холод-2") можно найти в работе [19] (см. также приведенные там ссылки).

Тщательный анализ позволил на основе полученных данных проследить ход кривой подсчетов радиоисточников в очень широком интервале плотностей потоков. В области плотностей потоков $0,86$ —

10 мЯн (на волне 7,6 см) интегральная кривая подсчетов с уменьшением потока растет все медленнее; общее число источников здесь оказалось в 3—10 раз меньше, чем предсказывали авторы менее чувствительных обзоров на основании анализа флуктуаций, обусловленных эффектом "насыщения" (об этом эффекте см., например, доклад В.В. Виткевича в [105]).

Это было первое (полученное уже в 1981 г.) указание на эффект "обратной эволюции" мощных радиоисточников, т.е. на то, что их пространственная плотность, начиная с некоторого значения красного смещения $z=z_{\text{max}}$, резко убывает. Однако в отличие от декаметрового обзора на УТР-2 и от некоторых более высокочастотных обзоров данные наблюдений на РАТАН-600 не дают указаний на существование новой популяции радиоисточников умеренной светимости по крайней мере среди источников с потоками $S \geq 1$ мЯн, а возможно, даже и среди более слабых (0,2—1,0 мЯн) источников.

Не менее важными являются и результаты программы "Холод" по поиску анизотропии реликтового 3-градусного излучения. Прежний верхний предел на амплитуду мелкомасштабных флуктуаций в этих наблюдениях удалось понизить более чем на порядок, и теперь он составляет $\Delta T_{\text{я}} \approx 3 \cdot 10^{-5}$ К. Подробнее этот результат и важные космологические следствия из него рассмотрены в гл. 3.

Исследования распределений яркости 47 радиогалактик, выполненные на радиотелескопе РАТАН-600 Н.С. Соболевой [133], показали, что в диапазоне 2—13 см их радиоизображения практически не зависят от частоты. Оказалось, что более 30% радиогалактик обладают "точечным" ядром (совпадающим по положению с оптическим объектом), спектр которого более пологий, чем в целом у радиогалактики. Из отсутствия заметного смещения спектров двух компонентов радиоизлучения радиогалактик Лебедь А и Центавр А следует, что скорость их взаимного удаления много меньше скорости света.

Вывод о подобии распределений яркости в радиогалактиках на разных частотах сантиметрового диапазона не следует распространять на очень широкий интервал частот. Так, сопоставление данных наблюдений свыше 130 внегалактических радиоисточников на радиоинтерферометре ФИАН с переменной базой ($\lambda = 3,5$ м, угловое разрешение $\sim 0,5'$) с результатами исследований структуры радиоисточников на волнах 21 и 31,3 см свидетельствует о том, что доля плотности потока радиогалактик, приходящаяся на относительно компактную структуру (детали малых размеров в ядрах галактик, струйные выбросы, горячие пятна), в метровом диапазоне волн меньше, чем в дециметровом [134].

Эти же исследования структуры радиоисточников на волне 3,5 м показали, что у большинства радиоизлучающих квазаров, так же как и у мощных радиогалактик, наблюдаются протяженные компоненты радиоизлучения размерами в сотни килопарсек, только их относительный вклад в общее излучение квазаров (особенно в случае квазаров с пологими спектрами) заметно меньше, чем у радиогалактик. Была установлена также сильная корреляция радиосветимостей протяженной и относительно компактной структур мощных радиогалак-

тик, которая свидетельствует о том, что продолжительность стадии активности ядра галактики должна быть сравнима с временем ее жизни как мощного радиоисточника.

В 1964 г. появилось первое сообщение А. Хьюиша (Маллардская радиоастрономическая обсерватория, Англия) о наблюдениях мерцаний компактных ($\leq 1''$) радиоисточников на неоднородностях межпланетной плазмы. Вскоре аналогичные наблюдения были начаты и на радиотелескопе ДКР-1000 ФИАН группой сотрудников под руководством В.В. Виткевича [135]. И английские, и советские исследователи хорошо понимали, что подобные наблюдения несут информацию не только о строении сверхкороны Солнца и межпланетной плазмы, но и о структуре мерцающих радиоисточников. Для получения таких сведений Хьюиш с сотр. использовали зависимость индекса мерцаний радиоисточника от элонгации, которую можно построить, наблюдая мерцания источника на большом интервале времени, в течение которого угловое расстояние источника от Солнца существенно изменится. В работах В.И. Шишова и др. (см., например, [136]) были заложены основы и развит иной метод, основанный на анализе спектра мощности флуктуаций, обусловленных мерцаниями радиоисточника. Этот спектр в принципе можно получить и в течение одного сеанса наблюдений, но желательно при близкой к оптимальной (для данной длины волны) элонгации радиоисточника.

Первые выводы о структуре нескольких сравнительно мощных радиоисточников (ЗС 48, 123, 161 и др.) на волнах 3,5; 5 и 7,9 м были получены уже по наблюдениям на радиотелескопе ДКР-1000. Введение в строй радиотелескопа БСА ФИАН (1974 г.) существенно расширило возможности таких исследований: даже в одиночном сеансе наблюдений на этом радиотелескопе можно обнаружить мерцания радиоисточника с потоком мерцающего компонента $\sim 0,2 \div 0,3$ Ян на частоте 102 МГц; если же этот поток превышает 0,5 Ян, то можно получить и оценку углового размера этого компонента. Угловое разрешение метода на частоте ~ 100 МГц составляет десятые доли угловой секунды, что соответствует интерферометрам с базами в 1—2 тыс. км.

Анализ мерцаний в настоящее время выполнен уже для многих сотен галактик различных морфологических типов, а также для различных классов внегалактических объектов с активными ядрами. Установлено, что средняя мера мерцаний объектов типа BL Lac и квазаров выше, чем у радиогалактик [137]. Объекты с активными ядрами типа сильно переменных в оптическом диапазоне (OVV) или радиоисточники, обнаруживающие заметную переменность на низких частотах (LFV), по основным характеристикам компактной структуры (спектр, доля потока в мерцающем компоненте) оказались близки к квазарам (см. [134]).

В.А. Артюх [134] обратил внимание на то, что в ядрах активных эллиптических галактик в основном находятся радиоисточники с плоскими и инвертированными спектрами, обусловленные, как предполагается, синхротронным самопоглощением. В отличие от этого компактные радиоисточники в ядрах спиральных галактик в большинстве случаев имеют крутые спектры. Отсюда, по мнению Артюха,

можно сделать вывод, что в ядрах активных спиральных галактик магнитное поле слабее, а плотность релятивистских частиц выше, чем в ядрах эллиптических галактик.

В 1978 г. по наблюдениям на БСА ФИАН был выполнен анализ мерцаний группы слабых (≤ 1 Ян) радиоисточников из болонского каталога В2. Средний индекс мерцаний этих радиоисточников оказался меньше, чем можно было ожидать исходя из экстраполяции данных о структуре источников с большими плотностями потоков, что позволило сделать вывод о заметной космологической эволюции линейных размеров радиогалактик и квазаров [138].

Заметим, наконец, что метод мерцаний на неоднородностях межпланетной плазмы был с успехом применен и для исследований структуры некоторых радиоисточников в декаметровом диапазоне волн по наблюдениям на радиотелескопе УТР-2 (см., например, [139]).

Радиоастрономические исследования скоплений галактик. Уже вскоре после того, как были выполнены первые отождествления радиоисточников с галактиками, стало ясно, что многие из радиогалактик являются членами достаточно богатых скоплений [102]. По мере накопления новых данных о радиоисточниках и скоплениях этот вывод о корреляции радиоисточников со скоплениями галактик приобретал все большую статистическую значимость. Большое внимание вопросам отождествления радиоисточников со скоплениями и с отдельными членами этих скоплений уделялось в работах Г.М. Томасяна и других сотрудников Бюраканской астрофизической обсерватории. Так, например, в работе [140] было установлено, что большинство высокоширотных источников радиоизлучения отождествляются с галактиками, входящими в состав скоплений. И поскольку отождествления в то время были выполнены лишь для небольшого числа наиболее ярких радиоисточников, делается вывод, что и среди более слабых источников многие должны отождествляться с членами далеких скоплений. Обращалось внимание и на то, что галактики, ассоциирующиеся с радиоисточниками, оказываются пекулярными как по своей морфологии, так и по спектру оптического излучения. Предпринимались попытки установить корреляцию параметров радиоизлучения скопления с богатством или морфологическим классом скопления, но они долгое время не давали положительного результата [141, 142].

Одни из первых наблюдений радиоизлучения небольшой выборки скоплений галактик были выполнены Г.Б. Шоломицким и Ю.Ф. Кокиным [143]. Авторам этой работы удалось зарегистрировать радиоизлучение 14 скоплений из каталога Эйбла и оценить их интегральную радиосветимость. Значительно большие возможности для проведения исследований радиоизлучения скоплений галактик появились с введением в строй радиотелескопов РАТАН-600 и БСА.

В 1977 г. сотрудниками РАС ФИАН совместно с А.Г. Губановым (Астрономическая обсерватория ЛГУ) были начаты наблюдения в рамках обширной программы исследований радиоизлучения скоплений галактик в метровом диапазоне волн. Наряду с измерениями интегральных плотностей потока нескольких довольно представи-

тельных выборок богатых скоплений Эйбла, включающих в общей сложности около 150 скоплений, были выполнены более детальные исследования трех из числа ближайших богатых скоплений — это скопления в созвездиях Дева (Vir), Персей (Per, A 426) и Волосы Вероники (Coma, A 1656). В наблюдениях этих трех скоплений, помимо радиотелескопа БСА ФИАН, использовались также антенна ДКР-1000 ФИАН и радиоинтерферометр ФИАН с переменной базой. Основные результаты этих исследований изложены в [134].

Оказалось, что по крайней мере в 90% случаев радиосветимость скоплений в метровом диапазоне обусловлена излучением одного-двух наиболее мощных радиоисточников, и она в 10—100 раз, а то и более выше суммарного излучения основной массы галактик скопления. Эти активные галактики, которые можно отнести к числу слабых радиогалактик (их радиосветимость в тысячи и десятки тысяч раз выше, чем у Галактики или туманности Андромеды), в подавляющем большинстве случаев оказываются массивными эллиптическими галактиками, в оптических спектрах которых очень часто обнаруживаются эмиссионные линии горячего межзвездного газа. Как известно, наличие подобных эмиссионных линий является важнейшим аргументом в пользу предположения, что активность галактических ядер поддерживается энергией аккрецирующих на эти ядра потоков газа.

М.В. Конюковым было показано [134], что в подавляющем большинстве эллиптических галактик газ, поставляемый звездами за счет их корпускулярной активности, непрерывно вытекает в межгалактическую среду в форме "галактического ветра", однако при очень больших массах галактик стационарное истечение типа галактического ветра невозможно. Аккрецирующие на центр галактики течения могут обеспечить, пожалуй, наиболее естественный сток массы, компенсирующий корпускулярную активность звезд в гигантских эллиптических галактиках. Поэтому неудивительно, что достаточно мощные внегалактические радиоисточники отождествляются именно с такими галактиками.

Наблюдения представительной выборки богатых скоплений галактик позволили построить локальную функцию радиосветимости ρ (P) этого класса объектов. Чуть меньше 10% общего числа эйбловских скоплений имеют радиосветимость на частоте 102 МГц $P_{102} < 10^{24.2}$ Вт/Гц, в то же время суммарное излучение составляющих такие скопления нормальных галактик оказывается более $10^{23.5}$ Вт/Гц. В области высоких радиосветимостей ($P_{102} \geq 10^{26.5}$ Вт/Гц) функция ρ (P_{102}) быстро приближается к функции радиосветимости мощных внегалактических радиоисточников, что вполне естественно, если только большинство мощных радиогалактик действительно входят в состав богатых скоплений [134].

Обнаружена заметная корреляция радиосветимости с богатством скоплений. Наклон регрессионной прямой $\lg P_{102} = k \lg N_A + c$ (где N_A — число галактик скопления в подсчетах Эйбла) вплоть до значений $N_A \approx 100$ составляет $k = 1,8 \pm 0,2$. Это означает, что радиосветимость скопления растет быстрее, чем число его членов, а значит, что для каждой данной галактики вероятность стать мощным радио-

источником больше в более богатом скоплении. При дальнейшем росте N_A (классы богатства $R \geq 3$) коэффициент k уменьшается. Найдена положительная корреляция радиосветимости и спектрального индекса радиоизлучения со светимостью скопления в рентгеновском диапазоне 2—6 кэВ, а также корреляция параметров радиоизлучения с морфологическим типом скопления [134].

Из тех же наблюдений были получены оценки (в большинстве случаев верхние пределы) радиосветимостей протяженных источников радиоизлучения типа радиогало скоплений. Установлено, что скопления, обладающие достаточно мощным радиогало (подобным радиогало в скоплении Сoma или более ярким), должны быть крайне редки. Небольшой процент скоплений с мощным радиогало, как показано в работе [144], вполне согласуется с предположением, что эти радиоисточники не представляют собой единого физического образования, а являются совокупностью нескольких остатков некогда активных галактик скопления, даже если время жизни этих остатков относительно мало.

Наблюдения более сотни богатых скоплений галактик выполнены к настоящему времени и на радиотелескопе РАТАН-600 на нескольких волнах сантиметрового диапазона. Окончательный анализ полученных данных будет представлять большой интерес для уточнения высокочастотных спектров радиоизлучения источников в скоплениях и для выяснения влияния межгалактической среды на эволюцию протяженных компонентов радиогалактик в скоплениях.

В 1969 г. Я.Б. Зельдович и Р.А. Сисняев обратили внимание на то, что электромагнитное излучение, поступающее к нам от источника, расположенного за скоплением, должно испытывать томпсоновское рассеяние на свободных электронах межгалактического газа скопления. Таким источником для каждого скопления может служить реликтовый фон [145]. На частотах $\nu < \nu_0 \approx 200$ ГГц в направлении на скопление должна наблюдаться пониженная яркостная температура, в то время как на частотах $\nu > \nu_0$ температура фона будет выше, чем средняя (т.е. 2,7 К). Ожидаемый эффект невелик ($\Delta T \approx 10^{-3}$ К) даже в направлении богатых газом скоплений галактик, и потому неудивительно, что его обнаружение потребовало значительных усилий и времени. Но в настоящее время можно уже уверенно говорить об обнаружении уменьшения яркостной температуры фона на сантиметровых волнах в направлении эйбловских скоплений А 665, А 2218, а также в направлении очень богатого и далекого ($z = 0,541$) скопления 0016+16.

Поскольку величина ΔT не зависит от расстояния до скопления D , а наблюдаемый поток рентгеновского излучения пропорционален D^{-2} , то сопоставление результатов наблюдений скопления в рентгеновском и сантиметровом диапазонах обеспечивает в принципе уникальную возможность оценки расстояния до скопления, не прибегая к измерениям красного смещения, а значит, представляет и новый метод измерения постоянной Хаббла. Несмотря на значительные трудности, связанные с учетом конечной разрешающей способности радио- и рентгеновского телескопов, неоднородного распределения межгалактичес-

кого газа скопления и других проблем, связанных уже с конкретной ситуацией в том или ином скоплении, такие оценки постоянной Хаббла, по-видимому, могут быть получены уже в сравнительно скором времени. Как показано в работе [146], имеется также принципиальная возможность по эффекту Сюняева—Зельдовича измерить скорость скопления относительно локальных сопутствующих космологических систем отсчета, однако решение этой наблюдательной задачи требует повышения чувствительности по крайней мере на 1—2 порядка.

Наконец, надо упомянуть еще об одном важном следствии взаимодействия фотонов реликтового фонового излучения с горячим межгалактическим газом скоплений. Как показано в работе [147], высокочувствительные обзоры неба на волнах миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов, которые могут быть выполнены уже в скором времени, должны обнаружить в направлениях на скопления отклонения температуры реликтового фона от среднего значения. На частотах $\nu > \nu_0$ эти отклонения в яркости фона будут выглядеть как обычные источники радиоизлучения. Но на частотах $\nu < \nu_0$ формально определенные плотности потоков таких "источников" будут отрицательны ($\Delta T_\phi < 0$). Распределение этих "источников" по плотностям потоков должно быть тоже довольно специфическим (на всех частотах), и если только скопления с горячим межгалактическим газом существуют на красных смещениях $z > 1$, то статистика радиоисточников в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах будет очень чувствительна к плотности вещества во Вселенной, т.е. к параметру Ω .

Нет сомнений, что за 40 лет, прошедших со времени первых отечественных радиоастрономических наблюдений, советская радиоастрономия внесла заметный вклад в исследование галактических и внегалактических объектов. И сегодня в стране имеются современные высокочувствительные радиотелескопы, позволяющие проводить глубокие обзоры и исследования спектров большого числа слабых радиоисточников. В то же время у нас до сих пор нет действующих систем апертурного синтеза, да и наблюдения на радиоинтерферометрах со сверхдлинными базами ведутся в очень ограниченном объеме. Отсутствие возможности получения двумерных радиоизображений острее всего ощущается при исследовании галактических и внегалактических радиоисточников. Поэтому создание многоэлементных радиотелескопов, позволяющих синтезировать изображения исследуемых объектов, несомненно является главной задачей, стоящей перед советскими радиоастрономами.

Подчеркивая характерную особенность современной астрономии, ее часто называют всеволновой. Исследования одних и тех же космических объектов ведутся порой сразу во всех диапазонах электромагнитного спектра. И хотя специфика эксперимента позволяет говорить о результатах радиоастрономических, оптических или рентгеновских наблюдений в отдельности, все чаще возникает необходимость в проведении комплексных программ исследований. И сегодня для успешного решения многих астрофизических проблем необходима тесная кооперация усилий радиоастрономов, астрономов-наблюдателей, работающих в других диапазонах электромагнитных волн, и, конечно же, астрофизиков-теоретиков.

РАЗВИТИЕ КОСМИЧЕСКОЙ РАДИОСПЕКТРОСКОПИИ В СССР

Первые радиоастрономические исследования были связаны с регистрацией космического радиоизлучения, имеющего непрерывный спектр. Такое излучение исходит от Солнца, Луны, галактических и внегалактических источников. Позднее выяснилось, что спектр космического радиоизлучения, принимаемого из многих направлений, содержит также вполне обнаружимые узкие спектральные линии — радиолинии, обусловленные переходами между различными квантовыми состояниями атомов и молекул.

Эти радиолинии несут богатейшую информацию о строении окружающего нас пространства. Поскольку их частоты могут быть вычислены на основании известных атомных и молекулярных констант и проверены в лаборатории, то источники регистрируемых радиолиний обычно можно отождествить с определенными элементами или соединениями, т.е. как бы провести химический анализ космического пространства. Небольшое отличие принимаемой частоты от расчетной, не мешающее обычно отличить одно вещество от другого, позволяет определить лучевую скорость движения источника на основании известного эффекта Доплера. Знание скорости дает возможность при определенных предположениях вычислить расстояние до источника. В результате с помощью радиолиний можно определить не только, какое вещество излучает, но и где оно находится и с какой скоростью движется.

Интенсивность радиолиний несет информацию о количестве вещества, а также, особенно если измерено несколько линий, об основных физических условиях излучающей среды: ее температуре и плотности.

Таким образом, исследования спектральных радиолиний космического излучения дают возможность узнать состав, строение, динамику материи окружающего пространства, познать происходящие в ней эволюционные процессы.

Высокая информативность и специфика исследований спектральных радиолиний способствовали быстрому развитию этого направления во многих странах мира, включая Советский Союз.

Ниже описывается развитие исследований в области космической радиоспектроскопии в нашей стране.

2.1. НАЧАЛЬНЫЙ ЭТАП

Расчеты и первые наблюдения линии водорода 21 см. Начало исследований спектральных радиолиний космического происхождения связано, как известно, с линией нейтрального водорода на волне 21 см, обусловленной переходами между близкими подуровнями сверхтонкого расщепления основного уровня атома водорода. Излучение этой линии было предсказано голландским ученым Ван де Холстом в 1944 г. В 1948 г. И.С. Шкловский провел детальные расчеты ожидаемой интенсивности этой линии и показал, что она вполне может быть заре-

гистрирована при чувствительности радиоастрономической аппаратуры, существовавшей в то время. Излучение радиолинии было обнаружено в 1951 г. почти одновременно американскими, голландскими и австралийскими радиоастрономами [1].

В Советском Союзе экспериментальные работы по исследованиям линии 21 см начались значительно позже, чем за рубежом. Несмотря на предложения Шкловского, который после проведения им расчетов интенсивности линии неоднократно обращался к радиоастрономам-экспериментаторам, последние, не найдя необходимых сил и средств, долгое время к работам по обнаружению линии 21 см не приступали. Практическая работа началась только в 1953 г. в ФИАНе по инициативе одного из пионеров советской радиоастрономии Б.М. Чихачева. В этом году им совместно с Р.Л. Сороченко была начата разработка радиоспектрометра для детальных исследований линии водорода. Предполагалось использовать радиотелескоп В-3, который в это время создавался в Крымской экспедиции ФИАНа.

Создание аппаратуры для исследований линии 21 см было по тем временам далеко не простой задачей — к началу работы в стране практически не было измерительной аппаратуры диапазона 21 см. Эту аппаратуру приходилось создавать собственными силами. Работа над сложной высокочувствительной аппаратурой происходила в Крымской экспедиции ФИАНа в условиях отсутствия стационарной электроэнергии и при других экспедиционных трудностях [2].

Первые записи линии 21 см в Крыму были получены 28 декабря 1955 г. Это были первые успешные наблюдения в области спектральной радиоастрономии в нашей стране. На рис. 2.1 приведены полученные в этот день контрольная спектрограмма (при антенне, отведенной от направления на плоскость Галактики) и спектрограмма области Лебедь X ($l^I=45^\circ$, $b^I=0$), по которой замерена линия 21 см.

Прошло, однако, еще около 3 лет, пока в Крыму наладились регулярные наблюдения линии 21 см [2].

В радиоспектрометре, работающем по принципу модуляции частоты приема, были достигнуты весьма хорошие по тем временам параметры: шумовая температура 1500 К (в однополосном режиме), разрешение по частоте 20 кГц, флуктуационная чувствительность $1,6^\circ$ (20 кГц, постоянная времени 64 с). В спектрометре был применен хорошо оправдавший себя метод двухканального приема с балансным детектором, дающий по сравнению с одноканальным приемом увеличение чувствительности на 40% при одновременном увеличении стабильности работы [3]. Радиотелескоп был оборудован системой автоматического управления, обеспечивающей наведение телескопа с погрешностью не хуже $3'$, что позволило проводить исследования, требующие длительных непрерывных наблюдений.

На рис. 2.2 приведен профиль линии 21 см, полученный из области Лебедь X после завершения всех аппаратурных разработок. Как сильно он отличается от аналогичного профиля, полученного при первых наблюдениях! На рис. 2.1 можно лишь с трудом различить двухгорбую структуру линии. В спектрограмме 1959 г. (см. рис. 2.2) отчетливо выде-

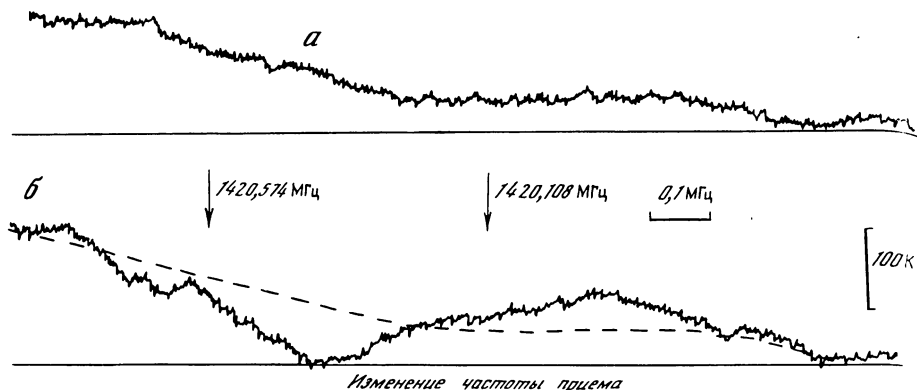


Рис. 2.1. Первая, полученная в СССР 28.12.55 г., запись линии 21 см

a — спектрограмма при антенне, отведенной от плоскости Галактики (аппаратный профиль); *b* — спектрограмма в направлении $l=45^\circ$, $b^l=0$ ($\alpha=20^h29^m$, $\delta=39^\circ$). Штриховая линия — нулевая линия (аппаратный профиль). Отчетливо видна спектральная линия, которая наблюдается дважды: сначала она дает отрицательное смещение относительно нулевой линии, затем — положительное, что обусловлено применением частотного радиометра

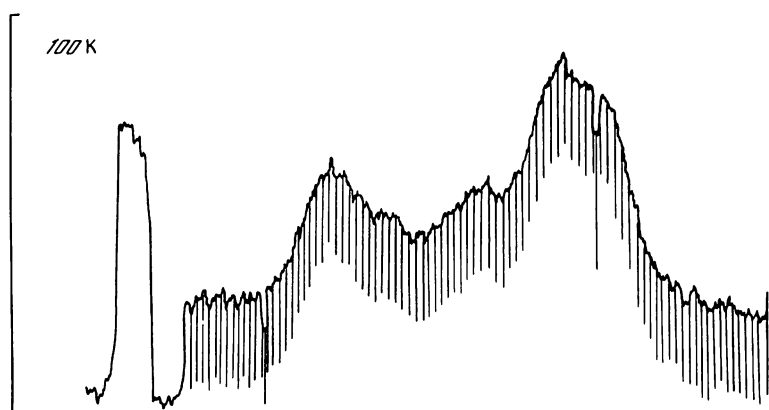


Рис. 2.2. Профиль линии 21 см в направлении $\alpha=20^h28^m$, $\delta=39^\circ$, полученный в Крыму 7.08.59 г.

Короткие вертикальные линии — метки частоты через 10 кГц; длинные линии — опорные частоты. Слева калибровочная ступенька

ляются многие мелкие детали, которые несут ценную информацию о пространственном распределении нейтрального водорода.

Поиск других спектральных радиолний. К начальному этапу развития спектральной радиоастрономии в нашей стране следует также отнести теоретические и экспериментальные работы первой половины 50-х годов, посвященные поиску новых космических радиолний. В своей пионерской работе по расчетам интенсивности линий нейтраль-

ного водорода на волне 21 см, а также в последующих работах, выполненных в 50-х годах, Шкловский указал на возможность присутствия в спектре космического излучения целого ряда других радиолиний. Им было показано, что аналогично водороду за счет переходов между уровнями сверхтонкой структуры можно ожидать излучения в радиолиниях дейтерия и азота: у первого — на волне 92 см, а у второго — в декаметровом диапазоне на волнах 12,5 и 30 м [1]. Согласно расчетам Шкловского, за счет другого механизма — “ λ -удвоения” — в радиодиапазоне можно было также ожидать излучения линий простейшими молекулами: OH, CH, NH, CN [1].

Работы Шкловского привлекли внимание экспериментаторов различных учреждений Советского Союза. Исходя из имевшихся возможностей, был предпринят ряд попыток обнаружения предсказанных радиолиний.

В начале 1954 г. в Крымской экспедиции на радиотелескопе “Большой Вюрцбург” попытались обнаружить линию CH, излучение которой предполагалось в 10-сантиметровом диапазоне. Был разработан радиоспектрометр этого диапазона, работавший по принципу частотного радиометра с балансным методом приема. В пределах 12 МГц от расчетного значения 3180 МГц линия в направлении центра и антицентра Галактики с верхней оценкой 30 К (при ожидаемой, согласно расчетам, интенсивности 100 К) обнаружена не была [4].

Аналогичная попытка обнаружить линию CH была предпринята в это же время горьковскими радиоастрономами, которые также получили отрицательный результат [5].

Как теперь известно, линия CH в спектре галактического радиоизлучения действительно присутствует, но ее интенсивность существенно слабее, чем предполагалось в то время. Линия была обнаружена только в 1973 г. шведскими радиоастрономами с помощью весьма чувствительной аппаратуры с мазером на входе [6]. Интенсивность линии составляет всего десятые доли градуса, и, естественно, аппаратурой, имевшейся в 50-е годы, эта линия обнаружена быть не могла.

Весьма драматично сложилась ситуация с поиском линии дейтерия, очень важной для понимания эволюционных процессов в Галактике, а также для космологии. В 1955 г. горьковские радиоастрономы сообщили об обнаружении этой линии в направлении на центр Галактики [7]. Обилие космического дейтерия относительно водорода, следовавшее из этих измерений, оказывалось равным $3,3 \cdot 10^{-3}$, что превышало аналогичное значение для Земли.

Последующие измерения, однако, не подтвердили эти данные. В 1958 г. Р.Л. Эджи получил отрицательный результат при поиске линии дейтерия в направлении источника Стрелец А, оценив верхний предел отношения плотности дейтерия и водорода, равный $4 \cdot 10^{-4}$ [8, с. 347—349]. Проведенные еще через 15 лет тщательные (с накоплением сигналов в течение 100 ч) наблюдения на частоте линии дейтерия в направлении центра Галактики показали, что намечается очень слабое поглощение [9]. Однако авторы не считают полученные результаты достоверными и дают лишь верхний предел отношения обилия дейтерия и водорода, равный $3,5 \cdot 10^{-4}$.

2.2. ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИНИЙ НЕЙТРАЛЬНОГО ВОДОРОДА НА ДЛИНЕ ВОЛНЫ 21 СМ

Исследования в Крыму. Первая выполненная в нашей стране программа по наблюдениям в линии 21 см была осуществлена в 1958—1959 гг. Наблюдения проводились на радиотелескопе В-3 после завершения всех антенно-аппаратурных работ, о которых говорилось выше. Целью исследований было получение данных о распределении нейтрального водорода (H I) на площадке $8^\circ \times 8^\circ$ в центральной части созвездия Лебедь, около источника радиоизлучения Лебедь X. Было получено около 300 профилей линии с общим временем наблюдений ~ 1500 ч [10].

В результате проведенных наблюдений было установлено, что нейтральный водород в исследуемой области входит в три спиральных рукава Галактики, находящиеся на расстояниях соответственно 1—4, 6—7 и 9—10 кпк от Солнца. В ближайшем к нам рукаве были найдены области, где нейтральный водород отсутствует, что проявилось в виде провалов в профилях линии 21 см при соответствующих скоростях. В картинной плоскости минимумы в линии 21 см хорошо совпадали с максимумами радиоизлучения в непрерывном спектре. Это позволило предположить, что дефицит нейтрального водорода связан с его ионизацией: источник Лебедь X представляет собою ряд областей H II, расположенных на различных расстояниях от Солнца внутри первого спирального рукава, направленного здесь тангенциально [11]. Такая модель вкрапленных в нейтральный водород областей ионизованного водорода — модель "теста с изюмом" — была впоследствии подтверждена прямыми измерениями расстояний до области H II по радиолиниям возбужденного водорода. Найденные по этим линиям положения областей H II хорошо совпадали с координатами "дырок" в распределении нейтрального водорода, измеренными по линии 21 см.

Очень интересные исследования осуществили на Крымском радиотелескопе сотрудники ГАИШ Т.А. Лозинская и Н.С. Кардашев. С целью изучения распределения нейтрального водорода во внешних областях Галактики они провели обширную программу наблюдений линии 21 см во всем доступном в Крыму интервале галактических долгот ($l = 0 \div 220^\circ$). Наблюдения позволили установить важную закономерность: во внешних областях Галактики с увеличением расстояния от галактического центра слой нейтрального водорода, имеющий в центральных областях толщину 200 пк, существенно расширяется и изгибается относительно плоскости Галактики. На расстоянии 14 кпк от центра толщина слоя водорода достигает 2 кпк, а отклонение от плоскости — 700 пк [12]. На основании результатов наблюдений линии 21 см в Крыму, а также наблюдений неба, проведенных австралийскими радиоастрономами в Южном полушарии была построена единая модель спиральной структуры Галактики, в которой отчетливо выявились две спиральные ветви логарифмической спирали с углом закрутки $83\text{—}85^\circ$ [13].

Указанными наблюдениями группы ГАИШ был закончен крымский период исследований линии 21 см. В связи с развитием экспери-

ментальной базы ФИАН в Пушино и переводом туда сотрудников наблюдения на радиотелескопе В-3 в Крыму были прекращены.

Исследования в ГАО на БПР. Наблюдения линии 21 см начались в Пулково в Главной астрономической обсерватории (ГАО) в 1961 г. по инициативе С.Э. Хайкина [2]. Необходимая для этих наблюдений аппаратура — радиоспектрометр для волны 21 см — была разработана в 1959—1961 гг. Т.М. Егоровой и Н.Ф. Рыжковым. Радиоспектрометр ГАО был реализован по схеме радиометра постоянного тока; выход усилительного тракта разделялся на два разнесенных по частоте канала, один из которых настраивался на частоту линии, а другой — на соседний участок спектра. После детектирования выходы обоих каналов вычитались, в результате радиоспектрометр регистрировал сигнал, равный разности спектральных плотностей шума в двух сравниваемых участках спектра. Спектральное разрешение радиоспектрометра составляло 90 кГц, а чувствительность — $1^\circ (\Delta f = 90 \text{ кГц}, \tau = 8 \text{ с})$. Для увеличения эффективности наблюдений число сигнальных каналов уже на первом этапе наблюдений было доведено до трех [14].

Программа наблюдений линии 21 см в Пулково обуславливалась спецификой Большого пулковского радиотелескопа (БПР) [2]. Ставились такие наблюдения, которые не требовали длительного накопления сигнала и в которых выгодно использовалось высокое угловое разрешение инструмента. Первой программой по линии 21 см, осуществленной на БПР, было исследование поглощения в линии нейтрального водорода в направлении на источник Стрелец А. Было установлено, что все компоненты излучения источника испытывают примерно одинаковое поглощение в близлежащем водороде [15]. Последующий цикл исследований был посвящен детальному изучению как в непрерывном спектре, так и в линии водорода структуры ряда галактических источников — областей Н II и остатков вспышек сверхновых: W 14, W 28, W 38, W 43 и др. Были выявлены новые детали в источниках и определены или уточнены расстояния до них [16]. В источнике W 38 было обнаружено уменьшение концентрации Н I в плотном пылевом облаке за счет перехода его в молекулярную форму. В диапазоне галактической долготы $10\text{--}40^\circ$ наблюдения линии 21 см указали на наличие слоистой структуры распределения нейтрального водорода в спиральном рукаве [17].

Проведение наблюдений линии 21 см в ГАО постоянно сопровождалось работами по улучшению параметров радиоспектрометра, расширению его возможностей. В 1964 г. радиоспектрометр для волны 21 см был переведен на модуляционный метод работы с переключением антенна—эквивалент. При этом вычитание шумов канала сравнения и канала сигнала было сохранено: был реализован так называемый метод двойного сравнения. К 1968 г. число спектральных каналов в анализаторе было увеличено до 10; при этом была предусмотрена возможность проведения наблюдений с разрешением в 90 и 20 кГц. Выходная информация с анализатора стала регистрироваться в цифровой форме с записью на электронно-цифровом вольтметре. В дальнейшем была применена регистрация на перфоленду, что обеспечивало возможность последующей обработки данных на ЭВМ [18].

Осуществление всех указанных мероприятий позволило в 1968 г. приступить к проведению большой программы наблюдений на БПР — Пулковскому обзору неба. В рамках этой программы вся доступная на БПР часть небесной сферы была исследована в линии 21 см. На основании этих наблюдений был издан "Атлас кривых прохождения" [19], а затем и "Атлас карт", построенных отдельно для двух составляющих радиоизлучения нейтрального водорода на 10 лучевых скоростях — от $-21,8$ до $25,6$ км/с — относительно местного стандарта покоя [20]. По материалам этого обзора авторами были обнаружены два новых протяженных комплекса Н I в созвездиях Кит—Эридан и Лисичка—Дельфин и определены их параметры. Были получены новые данные о распределении нейтрального водорода внутри двух предполагаемых остатков вспышек сверхновых в ассоциации Скорпиона и в комплексе Кит—Эридан, а также к западу от Ориона.

Исследования на радиотелескопе РАТАН-600. В 1977 г. исследования в линии 21 см были начаты на радиотелескопе РАТАН-600 [2]. Один из облучателей этого инструмента был специализирован на наблюдениях спектральных линий и под руководством Н.Ф. Рыжкова оснащен спектроскопической аппаратурой. Вначале наблюдения в линии проводились с помощью 22-канального радиоспектрографа. С середины 1978 г. на РАТАН-600 стал применяться 40-канальный анализатор спектра с разрешением 30 кГц и регистрацией данных на магнитной ленте. Процесс наблюдений был полностью автоматизирован [21].

Первые результаты наблюдений в линии 21 см были получены на РАТАН-600 в 1978 г. Вокруг известного источника Орион А была обнаружена вращающаяся и расширяющаяся оболочка нейтрального водорода [22]. Вскоре аналогичное явление — наличие расширяющихся оболочек — было обнаружено вокруг Сверхновой W 28 и остатка Сверхновой в Единороге. Для двух последних оболочек характерна большая кинетическая энергия расширения газа. Вокруг молекулярного комплекса Стрелец В2 обнаружена вращающаяся и, следовательно, устойчивая в своей внешней части оболочка Н I [23].

В последние годы исследования в линии 21 см на РАТАН-600 развернулись широким фронтом. Программы наблюдений основывались на использовании высокого разрешения радиотелескопа (на волне 21 см диаграмма направленности имеет размер $2' \times 2''$) и ориентировались на исследования распределения и динамики нейтрального водорода в окрестностях галактических радиоисточников. Было исследовано распределение Н I вокруг 32 областей Н II и 24 остатков вспышек сверхновых. Оказалось, что 17 областей Н II и 12 остатков сверхновых окружены расширяющимися оболочками нейтрального водорода размером 4—120 пк, массой 10^2 — $4 \cdot 10^5 M_{\odot}$ и скоростями расширения 5—20 км/с [24, 25]. На основании этих данных была построена модель взаимодействия области Н II с окружающим газом на основе гипотезы о том, что наблюдаемые оболочки вызываются действием звездного ветра и возбуждающих область Н II звезд [26]. С привлечением других данных для нескольких объектов удалось определить спектр масс воз-

буждающих звезд и сделать заключение об условиях звездообразования. Для остатков сверхновых удалось определить ряд их эволюционных параметров, в том числе начальную энергию взрыва сверхновой [25].

2.3. ОТКРЫТИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИОЛИНИЙ ВЫСОКОВОЗБУЖДЕННЫХ АТОМОВ (РЕКОМБИНАЦИОННЫХ РАДИОЛИНИЙ)

Предсказание и обнаружение радиолиний. В 1958 г. Н.С. Кардашев, работавший в то время в ГАИШ, пришел к выводу о том, что в областях $H\ II$ — космических образованиях ионизованного водорода — можно обнаружить радиолинии водорода, обусловленные переходами между сильно возбужденными состояниями атома. Наиболее интенсивными, согласно его расчетам, должны быть линии, образующиеся при переходах между соседними уровнями, т.е. при переходах типа $n \rightarrow n-1$ [27], где n — главное квантовое число.

Выводы работы Кардашева, — противоположные выводам австралийского радиоастронома Дж. Уайлда, указавшего в 1952 г. на возможность образования радиолиний возбужденного водорода, но считавшего, что из-за своей многочисленности эти линии должны сливаться одна с другой [28], заинтересовали многих радиоастрономов как в СССР, так и за рубежом.

Первая попытка принять излучение предсказанных радиолиний была осуществлена в отделе радиоастрономии ГАО, руководимом С.Э. Хайкиным. В конце 1958 г. пулковские радиоастрономы Т.М. Егорова и Н.Ф. Рыжков, используя аппаратуру, созданную ими для линии дейтерия, и неподвижный параболоид размером 15×20 м, провели на частоте 328,6 МГц поиск линии водорода, обусловленной переходами между уровнями 272 и 271. Поиск указанной линии в области $H\ I$ между галактическими долготами $l = 60 \div 115^\circ$ не привел к положительному результату [29]. Также безрезультатными оказались поиски линий возбужденного водорода, проведенные вскоре за рубежом. Американские радиоастрономы из Гарвардского университета безуспешно пытались обнаружить радиолинию водорода $n_{167} \rightarrow n_{166}$ в туманности Ориона.

Несмотря на первые отрицательные результаты, большая перспективность исследований радиолиний возбужденного водорода стимулировала проведение дальнейших исследований в этом направлении. Тщательное рассмотрение проблемы, проведенное в ФИАНе в 1963 г., позволило выработать оптимальную программу поиска радиолиний возбужденного водорода на радиотелескопе РТ-22 ФИАН. В ее основу был положен анализ экспериментальных возможностей наблюдения указанных радиолиний, который показал, что оптимальным для поиска радиолиний возбужденного водорода на РТ-22 является диапазон длин волн ~ 3 см. В этом диапазоне от наиболее ярких областей $H\ II$ следовало ожидать излучения радиолиний с антенной температурой $\sim 0,5$ К [30].

Для обнаружения линии с использованием всего накопленного за 10 лет опыта был разработан специальный нулевой спектральный радио-

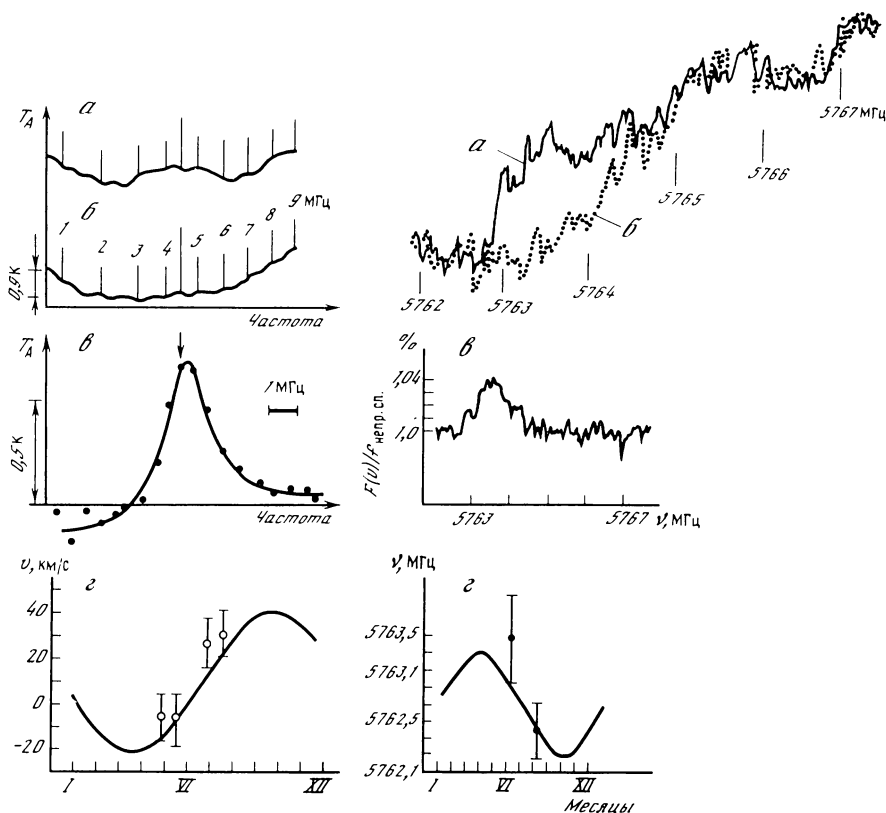


Рис. 2.3. Первые спектрограммы радиолиний возбужденного водорода и наблюдаемое смещение лучевой скорости (частоты) линий вследствие орбитального вращения Земли

Слева — наблюдения ФИАНа в линии Н 90 *а* (*а* — спектрограмма излучения туманности Омега; *б* — контрольная спектрограмма при антенне, отведенной от туманности (большая метка — расчетная частота ожидаемой линии, вертикальные линии — метки частоты через 1 МГц); *в* — результат усреднения 7 записей в направлении туманности Омега и 5 контрольных записей 27—28 апреля 1964 г. (стрелка — расчетная частота линии); *г* — доплеровский сдвиг радиолинии со временем (кривая — расчетная лучевая скорость туманности относительно Земли; точки — измеренные величины). Справа — наблюдения ГАО в линии Н 104 *а* (*а* — спектрограмма излучения туманности Омега; *б* — контрольная спектрограмма (ось абсцисс — частота); *в* — усреднение четырех спектрограмм, снятых в мае 1964 г. (ось ординат — отношение спектральных плотностей потока туманности и потока в непрерывном спектре); *г* — доплеровский сдвиг частоты линии со временем (кривая — расчетное изменение частоты; точки — измерения)

метр диапазона 3 см. В этом радиометре принимаемый сигнал от источника сравнивался с эталонным, имеющим гладкий спектр, а интенсивности обоих сигналов в континууме, в полосе более широкой, чем линия, с большей точностью поддерживались на входе постоянными. Устраняя влияния флуктуаций атмосферы, а также различных нестабильностей от других причин, такой радиоспектрометр позволял реализовать расчетную чувствительность при больших временах накопления.

В совокупности с примененным на входе параметрическим усилителем это позволило достигнуть флуктуационной чувствительности, составляющей сотые доли градуса в одиночной спектрограмме при разрешении по частоте 1 МГц, что было необходимо для поиска линии.

В начале 1964 г. радиоспектрометр для поиска линии был полностью отлажен и установлен на радиотелескопе РТ-22 ФИАН. В первый же день наблюдений, 27 апреля 1964 г., Р.Л. Сороченко и Э.В. Бородзичу удалось зарегистрировать в спектре туманности Омега отчетливо видимую уже в одиночной записи радиолинию возбужденного водорода, обусловленную переходами $n = 91 \rightarrow 90$ на частоте $\nu = 8872,5$ МГц (рис. 2.3, а, слева).

В последующих наблюдениях линия уверенно наблюдалась в спектре туманности Омега и не наблюдалась при антенне, отведенной от источника; частота линии смещалась со временем на величины, соответствующие доплеровскому сдвигу из-за орбитального вращения Земли. Это убедительно показало, что наблюдается действительно галактическая радиолиния, а не какой-либо аппаратурный или другой земной эффект (рис. 2.3, б—г, слева).

Полученные результаты позволили сделать вывод об обнаружении в туманности Омега радиолинии возбужденного водорода $n_{91} \rightarrow n_{90}$ [31, 31а]. Измеренные параметры линии — антенная температура в центре линии ($T_{a.l} = 0,65$ К), ширина (1 МГц) и отношение интенсивности линии и континуума — были в хорошем соответствии с расчетными величинами.

В то же время исследования возбужденного водорода продолжались в ГАО, где поиск радиолиний осуществлялся в диапазоне 5 см. Первая попытка, осуществленная А.Ф. и З.В. Дравских в декабре 1963 г. с помощью простого спектроанализатора с полосой 2 МГц, привела к предположительному обнаружению линии, обусловленной переходами между уровнями 105 и 104 атома водорода [32]. После усовершенствования аппаратурного комплекса, применения квантового парамагнитного усилителя и спектроанализатора с разрешением 280 кГц в мае—июле 1964 г. радиолиния возбужденного водорода $n_{105} \rightarrow n_{104}$ была уверенно зарегистрирована в туманности Омега [33, 34].

Результаты этих наблюдений приведены на рис. 2.3, где сведены вместе полученные впервые в мире в ФИАНе и в ГАО спектрограммы радиоизлучения возбужденного водорода с отчетливо видимыми линиями $H\ 90\alpha$ и $H\ 104\alpha$ ¹, а также наблюдаемое смещение лучевой скорости (частоты) в обеих линиях вследствие орбитального вращения Земли [31, 33].

31 августа 1964 г. результаты работ обеих групп советских радиоас-

¹Здесь и далее используются установившиеся для радиолиний высоковозбужденных атомов обозначения: наименование элемента по таблице Менделеева, номер уровня, на который происходит переход, порядок линии (греческой буквой). Обозначение $H\ 90\alpha$ соответствует линии водорода, обусловленной переходами между уровнями 91 и 90.

Радиолинии, излучаемые высоковозбужденными атомами, часто называют рекомбинационными радиолниями. Это связано с тем, что актам излучения предшествуют акты рекомбинации заряженных частиц — электронов и ионов, в результате чего и образуются высоковозбужденные атомы.

трономов, обнаруживших излучения радиолиний возбужденного водорода, были доложены на XII Генеральной ассамблее Международного астрономического союза (МАС) в Гамбурге [31, 34] и встречены с большим интересом мировой научной общественностью. Как вспоминает Ю.Н. Парийский, докладывавший результаты, полученные пулковской группой, советские сообщения явились настоящей сенсацией и полной неожиданностью для американских и западноевропейских радионастрономов.

Через год, в июле 1965 г., радиолинии возбужденного водорода были зарегистрированы в США. В Национальной радиоастрономической обсерватории было зарегистрировано излучение линии H 109 α в туманностях Орион и Омега [35]. В конце этого же года еще две линии, H 156 α и H 158 α , в диапазоне 18 см наблюдались в Гарвардском университете [36].

Таким образом, как в теоретическом предсказании, так и в экспериментальном обнаружении радиолиний возбужденного водорода бесспорный приоритет принадлежит нашей стране. Государственный комитет по делам изобретений и открытий при Совете Министров СССР зарегистрировал явление излучения радиолиний возбужденного водорода в качестве открытия, сделанного советскими радиоастрономами: сотрудниками ФИАН Р.Л. Сороченко и Э.В. Бородичем, сотрудниками ГАО А.Ф. и З.В. Дравских и автором предсказания Н.С. Кардашевым [37]. Приоритетной датой открытия принято 31 августа 1964 г., когда были сделаны доклады об обнаружении радиолиний на XXI Генеральной ассамблее МАС.

Исследования радиолиний высоковозбужденных атомов (основные физические результаты). Уже первые наблюдения радиолиний возбужденного водорода, проведенные в ФИАНе и ГАО, дали удивительные результаты. Выяснилось, что линии не уширялись и не размывались, как следовало ожидать из теории штарковского уширения [30]. Полученные данные привели к пересмотру теории уширения спектральных линий в плазме. Было установлено, что у высоковозбужденных атомов при упругих соударениях с заряженными частицами происходит своеобразная компенсация возмущений: соседние уровни возмущаются подобно и разница энергий между ними меняется на несколько порядков меньше, чем энергия самих уровней [38].

На основе теории, пересмотренной в соответствии с данными наблюдений радиолиний, были объяснены результаты первых лет, когда наблюдались линии вплоть до $n=166$, причем в них отсутствовал эффект штарковского уширения. Однако последующие наблюдения, когда в туманности Ориона наблюдались радиолинии с еще более высокими номерами переходов и у них также не было заметного уширения, вновь вызвали противоречия теории и эксперимента.

В целях всестороннего исследования физических закономерностей излучения радиолиний высоковозбужденными атомами, а также использования этих линий для астрофизических исследований в ФИАНе начиная со второй половины 60-х годов была развернута обширная программа исследования радиолиний на различных волнах миллиметрового, сантиметрового и метрового диапазонов.

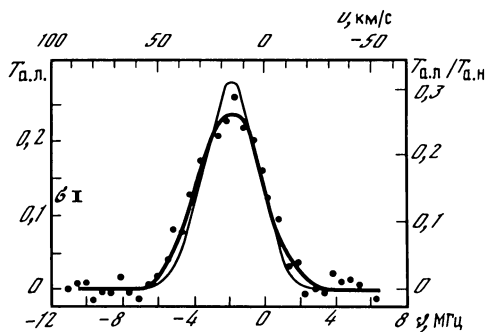
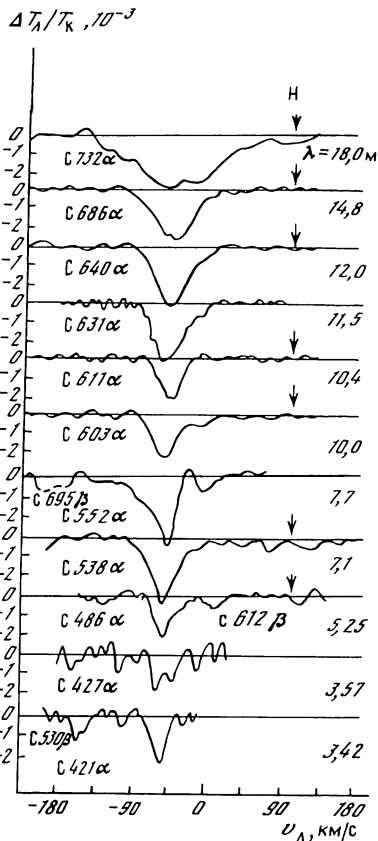


Рис. 2.4. Радиолиния возбужденного водорода Н 56 α в туманности Омега (РТ-22, июнь 1968 г.)

Ось абсцисс — доплеровское смещение частоты линии, лучевая скорость; ось ординат: левая — антенная температура; правая — отношение температуры линии и непрерывного спектра. Жирная линия — наблюдаемый профиль; тонкая — профиль, скорректированный за полосу анализатора

Рис. 2.5. Профили наиболее низкочастотных метровых и дециметровых спектральных линий углерода, обнаруженных в направлении Кассиопеи А, которые свидетельствуют о наличии в космосе атомов с уровнями возбуждения вплоть до $n = 732$

Ось абсцисс — лучевая скорость; ось ординат — глубина поглощения в линии T_{λ} относительно континуума T_K . Стрелками обозначены положения линий водорода, которые обнаружить не удалось



Осуществление этой программы потребовало существенного развития экспериментальной базы спектральных исследований, разработки новых аппаратных и методических средств наблюдений радиолиний.

В 1966 г. на РТ-22 ФИАН был введен в действие радиоспектрометр диапазона 5,2 см с мазером на входе и симметричной диаграммной модуляцией [39]. На его основе в практику спектральных наблюдений был введен новый метод — “наведение—наведение”, при котором регистрация спектрограмм осуществлялась при слежении за источником поочередно то с одним, то с другим возможным направлением приема. Результатом являлась разностная спектрограмма, полученная из пары записей. Такой метод по сравнению с обычным методом “наведение—отведение” обеспечивал в 2 раза лучшее отношение сигнала линии к дисперсии шума за то же время наблюдений и заметно уменьшал искажения “нулевой линии” спектрометра. С помощью радиоспектрометра диапазона 5,2 см на РТ-22 был осуществлен обзор областей Н II в линии Н 104α, которая была принята от целого ряда источников [40]. В одном из источников — туманности Ориона — с помощью указанного радиоспектрометра была обнаружена радиолиния

возбужденного гелия ($\nu = 5765$ МГц) [41], возможность наблюдения которого также предсказывалась в основополагающей работе [27].

В 1968 г. после осуществления комплекса мероприятий, связанных с разработкой высокочувствительного радиоспектрометра с мазером, на РТ-22 ФИАН были начаты исследования радиолиний возбужденного водорода в диапазоне 8 мм. На рис. 2.4 изображена спектрограмма радиолинии Н 56 α ($\nu = 36466$ МГц), принятой в июне 1968 г. в туманности Омега [42]. Эта линия оказалась первой в мире галактической радиолинией, зарегистрированной радиоастрономами в миллиметровом диапазоне. Позднее, после ввода в действие радиоспектрометра диапазона 1,35 см, на РТ-22 ФИАН были начаты также наблюдения линии Н 66 α .

Проведение широкой программы наблюдений радиолиний, в том числе очень слабых по интенсивности, потребовало еще одного важного шага в развитии потенциала РТ-22 ФИАН — перехода от последовательного спектрального анализа, осуществляемого перестройкой фильтра по полосе анализа, к параллельному — созданию многоканального анализатора спектра. Такой прибор — 32-канальный анализатор спектра с полосами 115 и 500 кГц, был введен в действие в 1974 г. Съем и обработка информации с анализатора осуществлялись с помощью ЭВМ М-6000. В дальнейшем на основе указанной ЭВМ, радиометров с мазерами, многоканального анализатора спектра и системы стабильных частот на РТ-22 был создан автоматизированный аппаратный комплекс для спектральных исследований [43]. Комплекс обеспечивал получение в автоматическом режиме спектрограмм с многочасовым накоплением, а также обработку полученных результатов на ЭВМ.

Создание комплекса позволило существенно расширить исследование радиолиний, излучаемых высоковозбужденными атомами, подойти на новом качественном уровне к проблеме штарковского уширения радиолиний. С целью решения этой проблемы в 1978 г. ФИАНом был предложен международный эксперимент по наблюдениям радиолиний на двух радиотелескопах: РТ-22 ФИАН и 100-метровом радиотелескопе (РТ-100) Института радиоастрономии Макса Планка (ФРГ).

Идея эксперимента заключалась в том, чтобы на РТ-22 в диапазонах 8,2 и 13,5 мм с разрешением 1,9 и 2,6' соответственно очень точно провести наблюдения в направлении ядра туманности Ориона линий Н 56 α и Н 66 α , записи которых должны определить доплеровский контур линии, а на РТ-100 — с близким угловым разрешением, т.е. на волнах, в 4—5 раз более длинных, провести наблюдения радиолиний с более высоких уровней, где в соответствии с теорией должно иметь место заметное штарковское уширение.

По этой программе на РТ-100 в диапазоне 3,3 см были проведены наблюдения линий Н 90 α — Н 161 ξ , а в диапазоне 6 см — линий Н 90 α , Н 137 β , Н 156 γ и Н 174 δ [44]. Для обработки результатов измерений в ФИАНе была создана специальная программа аппроксимации спектрограмм на ЭВМ.

В результате проведенных совместных исследований была четко выявлена хорошо согласующаяся с теорией зависимость штарковской

ширины радиолиний от номера уровня: $\Delta \nu_{\text{шт}} \approx N_e n^4$. Этим экспериментом была доказана справедливость пересмотренной теории спектральных линий в плазме и объяснены причины имевшихся ранее противоречий между наблюдениями и теорией [44].

Решение проблемы штарковского уширения объяснило, почему радиолинии возбужденного водорода оказалось возможным наблюдать при значительно более высоких номерах переходов, чем это предполагалось ранее. При этом возникал естественный и очень интересный для физики вопрос: сколько вообще в атоме может быть квантовых уровней и до какого предела можно пойти в наблюдениях радиолиний? С целью получения ответа в ФИАНе и в Отделении радиоастрономии Института радиофизики и электроники (ныне Радиоастрономический институт — РИ АН УССР) в Харькове были развернуты работы по поиску радиолиний, излучаемых атомами при уровнях $n=400 \div 700$ с частотами, подходящими на метровый и декаметровый диапазоны.

В Пушино с помощью крестообразного радиотелескопа ДКР-1000 [2] и антенны БСА [2] радиоастрономы ФИАНа совместно с радиоастрономами ГАИШ предпринимали неоднократные попытки принять линию водорода при $n=390 \rightarrow 410$ ($\lambda = 3$ м) в направлении центра Галактики и других источников. В процессе этих наблюдений чувствительность используемых аппаратных средств непрерывно улучшалась, однако, даже дойдя до уровня $T_{\text{а.л.}}/T_A \approx 4 \cdot 10^{-4}$, линию обнаружить не удалось [45].

Положительный результат был получен только в 1983 г. С помощью антенны Север—Юг радиотелескопа ДКР-1000 в спектре источника Кассиопея А в метровом диапазоне было обнаружено сразу несколько радиолиний, но не от водорода, который принять так и не удалось, а от возбужденного углерода: С 427 α ($\lambda = 3,56$ м), С 486 α (5,25 м), С 538 α (7,12 м) и С 612 β (5,25 м) [46].

Линии углерода с еще более высокими номерами переходов — С 630 α ($\lambda = 11,4$ м), С 631 α (11,5 м) и С 640 α (12 м) — были обнаружены в спектре Кассиопея А харьковскими радиоастрономами А.А. Коноваленко и Л.Г. Содиным с помощью крупнейшего в мире радиотелескопа декаметрового диапазона УТР-2 [2] с размерами 1800 $\times$ 900 м и специально разработанной высокочувствительной аппаратуры [47, 48]. Это были первые спектральные радиолинии декаметрового диапазона, обнаружение которых было встречено с большим интересом советскими и зарубежными радиоастрономами. Следует подчеркнуть, что декаметровые линии углерода были найдены раньше, чем метровые; это произошло также после безуспешных попыток принять линии возбужденного водорода [49].

В дальнейшем на УТР-2 было зарегистрировано еще несколько декаметровых линий углерода вплоть до линии С 732 α ($\lambda = 18$ м) — самой длинноволновой из обнаруженных в мире до настоящего времени [50]. На рис. 2.5 приведены профили радиолиний углерода, обнаруженных в метровом и декаметровом диапазонах в направлении на Кассиопею А, что свидетельствует о наличии в космосе атомов с уровнями возбуждения вплоть до $n = 732$.

Обнаружение метровых и декаметровых радиолиний углерода бы-

ло в значительной степени неожиданным и сразу поставило ряд вопросов. Вызвало удивление в первую очередь, что при наибольших уровнях возбуждения были приняты линии углерода и не были приняты линии в 3000 раз более обильного в космосе водорода. Была непонятна, далее, зависимость интенсивностей радиолиний от n : линии с $n > 500$ оказались более яркими, чем линии с $n < 500$; линии C 400 α зарегистрировать вообще не удалось [52]. И, наконец, после приема линий с номерами переходов $n = 500 \div 700$ еще более актуальным стал вопрос о предельном количестве уровней в атоме.

Ответ на первый вопрос получил строгое физическое обоснование. Как показал проведенный анализ, для образования радиолиний с наибольшими номерами переходов ($n > 500$) необходимо, чтобы межзвездная плазма имела не только очень низкую электронную плотность $N_e \leq 1 \text{ см}^{-3}$, но и была холодной. Требование низкой плотности связано с увеличивающейся с возрастанием n чувствительностью высоковозбужденных атомов к соударениям с электронами, которые эти атомы разрушают. Второе требование обусловлено тем, что с увеличением температуры резко растет вероятность рекомбинации и образования высоковозбужденных атомов. Поэтому только при низкой температуре в условиях очень малой концентрации электронов возможно образование радиолиний ощутимой интенсивности.

В межзвездной среде оба указанных выше требования выполняются вдали от горячих звезд. В этих областях наиболее обильный элемент среды — водород, ионизация которого сопровождается сильным нагревом ($T_e = 10^4 \text{ K}$), нейтрален. В то же время менее распространенные и имеющие меньший потенциал ионизации, чем водород, элементы оказываются ионизованными. Среди них углерод — самый обильный. Среда в этом случае сильно не нагревается ($T_e \leq 100 \text{ K}$). Поэтому при наиболее высоких уровнях возбуждения атомов наблюдаются именно линии углерода и не наблюдаются линии водорода [51]. Удалось разобраться и с интенсивностями радиолиний на метровых и декаметровых волнах. Здесь объяснение заключалось в сложной, неравновесной заселенности уровней [46].

Наиболее интересным для физики представляется вопрос о предельном количестве уровней в атоме. Сколько же устойчивых энергетических уровней может иметь атом и какие причины определяют этот предел? Если считать размер атома D по боровской модели, т.е. $D = n^2 a$, где a — боровский радиус, то атом при $n = 732$ имеет уже макроскопические размеры: $\sim 50 \text{ мкм}$ (!). Может ли существовать атом, возбужденный до уровня $n = 1000$, когда его размеры достигли $\sim 100 \text{ мкм}$, или до уровня $n = 3000$ с размерами $\sim 1 \text{ мм}$? Где предел и чем он определяется?

До обнаружения радиолиний углерода в декаметровом диапазоне считалось, что предел в образовании высоковозбужденных атомов обусловлен соударениями с электронами, т.е. значением электронной плотности плазмы. Однако в межзвездной среде, как стало очевидным, высоковозбужденные атомы могут формироваться в условиях очень малой электронной плотности, составляющей десятые, сотые и даже тысячные доли электронов в кубическом сантиметре. При таких плот-

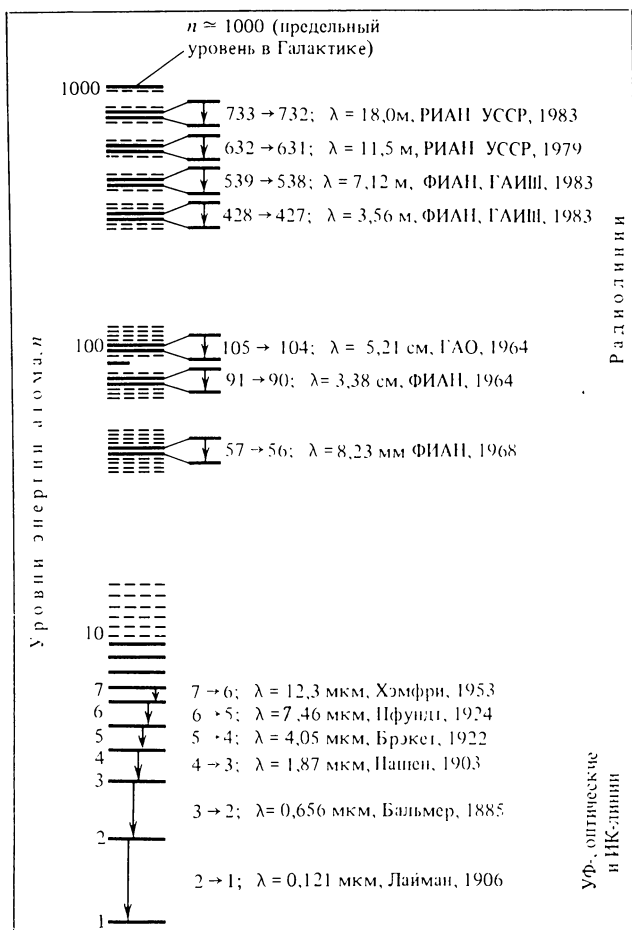


Рис. 2.6. Известные ранее спектральные линии ($n \rightarrow n-1$) атома водорода в УФ-, оптическом и ИК-диапазонах и обнаруженные в нашей стране приоритетные линии радиодиапазона, указывающие, что атом может существовать до уровней возбуждения $n \approx 1000$

ностях предел образования высоковозбужденных атомов, как можно показать, наступал бы при уровнях возбуждения, соответствующих многим тысячам. Воздействие на высоковозбужденные атомы нейтральных частиц еще слабее. В самом деле, сечения взаимодействия высоковозбужденных атомов с нейтральными частицами растут только до некоторого уровня $n = 20 \div 30$, после чего они остаются постоянными. В результате, при $n \approx 1000$ сечения взаимодействия с нейтральными частицами оказываются почти на 10 порядков меньше сечений взаимодействия с электронами. Можно считать, что в условиях очень разреженной среды нейтральные частицы пролетают между атомным остовом и орбитами высоковозбужденных электронов, не разрушая атомов и не вызывая в них каких-либо переходов.

Чем же определяется тогда максимальное количество уровней

возбуждения и предельные размеры атома? Как выяснилось, такой причиной является фоновое галактическое радиоизлучение. Это излучение в виде радиочастотных квантов пронизывает всю Галактику. С увеличением уровня возбуждения n сечение взаимодействия атома с такими квантами возрастает. Вместе с тем в связи с увеличением с длиной волны яркостной температуры фона ($T_{\phi} \approx \lambda^{2.55}$) плотность квантов, способных вызывать индуцированные переходы в высоковозбужденных атомах, быстро растет с увеличением n . Расчет показывает, что при $n \approx 1000$ время жизни атома на данном уровне становится столь малым, что никаких различимых спектральных линий мы не увидим [52].

Таким образом, в результате проведенных исследований было установлено, что в условиях Галактики атом как квантовая система может существовать до уровней возбуждения $n \approx 1000$. При этом его размеры в соответствии с боровской моделью достигают 0,1 мм. Причиной, ограничивающей существование в межзвездной среде еще более высоковозбужденных атомов, является нетепловое радиоизлучение Галактики.

Рис. 2.6 иллюстрирует, как расширялись наши знания об атоме, его возможных энергетических уровнях и квантовых переходах между ними в результате исследований радиолиний, излучаемых возбужденными атомами.

Использование радиолиний высоковозбужденных атомов для астрофизических исследований. Радиолинии высоковозбужденных атомов оказались новым, чрезвычайно эффективным средством для астрофизических исследований, в первую очередь для исследований межзвездной среды. Содержащаяся в линиях информация позволяет определять все основные параметры среды, ответственной за излучение линий: температуру, плотность, скорости внутренних движений, обилие и распределение химических элементов [53].

В исследованиях, проведенных в ФИАНе, по радиолинии H 56a была измерена электронная температура ряда областей H II с ошибкой не более нескольких процентов, что представляет самую высокую точность для измерений подобного рода. Согласно полученным данным, значения электронной температуры галактических H II областей лежат в пределах $(6-10) \cdot 10^3$ К [54].

Наблюдения низкочастотных радиолиний возбужденного углерода являются наиболее удобным источником сведений об электронной температуре холодных компонентов межзвездной среды вне зон H II: в диффузных межзвездных облаках, зонах C II, возникающих в молекулярных облаках [50, 52].

Как указывалось выше, была установлена четкая зависимость уширения радиолиний высоковозбужденных атомов от номера уровня и плотности электронов. Это позволило обосновать возможность определения электронной плотности новым методом — по величине штарковского уширения [44]. Метод был успешно применен для определения электронной плотности некоторых H II областей.

Уникальную возможность измерения малых плотностей электронов в межзвездной среде представляют атомы углерода, находящиеся в

сильно возбужденных состояниях ($n \geq 500$) и излучающие радиолнии в метровом и декаметровом диапазонах. По уширению этих линий удалось определить электронную плотность в областях Галактики с $N_e \approx 0,1 \text{ см}^{-3}$, что никакими другими способами измерить невозможно [46, 50].

Измерения доплеровского сдвига частоты радиолний высоковозбужденных атомов позволяют определить лучевую скорость источников излучения и расстояние до них. Измерениями, проведенными в ФИАНе по линиям H 104α и H 56α, были определены расстояния до ряда областей галактического ионизованного водорода [40, 54]. Исследованиями, проведенными в РИАНе УССР, была показана аналогичная возможность определения расстояния до областей C II по линиям возбужденно-го углерода [50].

По линиям высоковозбужденных атомов можно находить распределение ионизованного водорода, углерода и некоторых других элементов аналогично тому, как это было сделано для нейтрального водорода по измерениям в линии 21 см.

Характеристики линий возбужденных атомов дают нам очень ценную, подчас уникальную информацию о происходящих в Галактике эволюционных процессах, в частности процессах звездообразования. Так, по линиям возбужденного водорода в источнике W3 (OH) был впервые установлен факт расширения молодой компактной оболочки H II вокруг вновь образовавшейся звезды, определены основные физические параметры [55] и возраст оболочки, который составил всего 600 лет.

Таким образом, в результате обнаружения радиолний высоковозбужденных атомов и установления закономерностей их излучения арсенал средств астрофизических исследований пополнился новым эффективным методом с большим разнообразием возможностей. В настоящее время линии высоковозбужденных атомов — рекомбинационные радиолнии — "приняты на вооружение" практически во всех основных радиоастрономических обсерваториях мира. Они исследуются в широком диапазоне радиоволн от миллиметровых до декаметровых и с учетом всех возможных переходов являются самыми распространенными спектральными линиями космического радиоизлучения.

2.4. МОЛЕКУЛЯРНЫЕ РАДИОЛИНИИ

Радиолния OH. Вскоре после обнаружения линии межзвездного гидроксидла, что, как известно, было сделано в США в 1963 г. [56], исследования этой линии были предприняты в нашей стране в Пулковско на радиотелескопе БПР по предложению одного из участников работы по обнаружению линии OH американского ученого А. Баррета, приехавшего в СССР осенью 1964 г.

Для проведения наблюдений имевшийся в Пулковско радиометр для волны 21 см линии водорода был перестроен на диапазон линии, равный 18 см. Наблюдения оказались успешными: во всех трех каналах, настроенных на лучевые скорости 0, 40 и 130 км/с, в направлении на центр Галактики уверенно наблюдалась линия поглощения OH на часто-

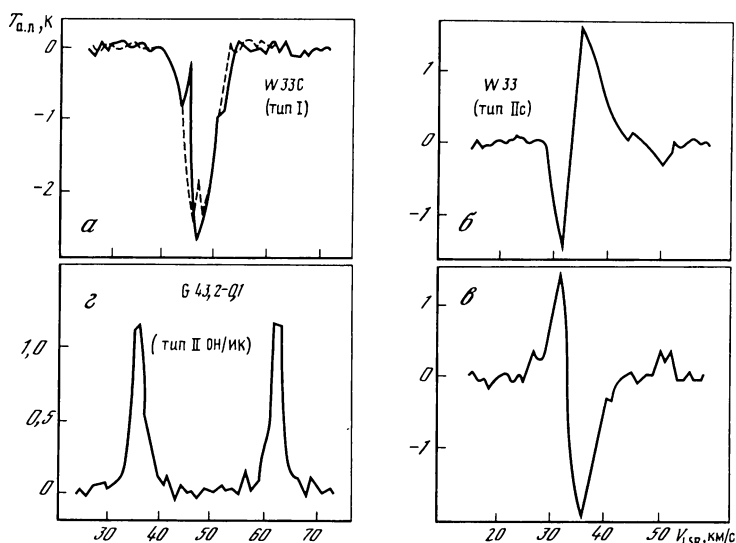


Рис. 2.7. Профиль главной линии ОН (1665 МГц), полученный в направлении зоны Н II W 33C (а), профили спутничных линий ОН(1642 МГц) и ОН (1720 МГц) (б, в) и профиль линии 1612 МГц нового мазера типа II в ОН/ИК, не отождествленного ни с каким астрономическим объектом (г)

а: на фоне линии видно излучение, которое происходит в левой (сплошная линия) и правой (штриховая) круговых поляризациях на различных лучевых скоростях. Излучение линии ОН, на 100% поляризованное по кругу, исходит из точечного мазера I типа; б, в — излучение исходит от протяженного источника — плотного молекулярного облака; г — излучение неполяризованное, исходит из точечного источника

те 1667 МГц [57]. Высокое угловое разрешение радиотелескопа БПР позволило при этом получить интересные данные о распределении поглощающей материи. Поглощение на скорости 40 км/с было асимметричным относительно центрального компонента источника Стрелец А — оптическая толщина линии в направлении на источник оказалась заметно меньше, чем к востоку от него [58]. В дальнейшем при использовании радиоспектрометра с квантовым парамагнитным усилителем (КПУ) на БПР были определены координаты некоторых мазерных источников [59].

Наиболее активно исследования линии ОН проводились в отделе радиоастрономии ГАИШ, руководимом И.С. Шкловским. Вскоре после того, как стало известно об обнаружении линии, в отделе началась разработка спектральной аппаратуры на волнудлинии ОН. В 1969 г. аппаратура, созданная М.И. Пашенко и Е.Е. Лехтом (16-канальный спектроанализатор с разрешением по частоте 20 кГц), в соответствии с соглашением о сотрудничестве в области спектральной радиоастрономии между ГАИШ и Медонской обсерваторией (Франция) была установлена на Большом радиотелескопе в Нансе, который очень хорошо подходил для наблюдений в диапазоне 18 см.

К этому времени уже было известно, что источники излучения ОН являются космическими мазерами [60]. Были объяснены многие

свойства этих удивительных объектов, что еще больше привлекло к ним внимание радиоастрономов. Особый интерес к мазерам ОН обуславливается, в частности, многочисленными фактами, свидетельствующими о связи источников с процессами образования звезд.

В 1970 г. на радиотелескопе в Нансе в диапазоне 18 см радиоастрономами ГАИШ и Института космических исследований АН СССР совместно с их французскими коллегами была начата программа исследования мазерных источников излучения на частотах всех четырех линий, образующихся в результате λ -удвоения основного состояния молекулы ОН: 1667, 1665, 1612 и 1720 МГц. В первом же цикле наблюдений, направленном на поиск новых космических мазеров, было обнаружено четыре новых источника ОН мазерного типа. Излучение исходило от холодных переменных звезд поздних спектральных классов [61].

В 1972 г. при исследовании поглощения в линии ОН в направлении на мощные тепловые источники радиоизлучения были обнаружены плотные молекулярные облака, в которые погружены мазерные источники ОН I типа (излучающие на частотах главных линий 1665 и 1667 МГц). Было установлено, что эти облака диаметром 3—5 пк и концентрацией вещества 10^3 см^{-3} "генетически" связаны с компактными зонами H II и мазерами ОН и, возможно, представляют ту среду, в которой эти образования возникли [62, 63].

Кроме протяженных источников излучения ОН, были обнаружены и "точечные" мазеры ОН различных типов в направлении компактных зон H II, объектов Хербига—Аро, ИК-звезд и остатка сверхновой звезды [64]. На рис. 2.7 приведены профили линии ОН для некоторых из обнаруженных источников, полученные на радиотелескопе в Нансе в ноябре 1973 г.

Радиолинии H_2O . Первые измерения линии H_2O на волне 1,35 см были проведены в нашей стране в июле 1969 г. сразу после получения информации об обнаружении этой линии [65]. Наблюдения проводились на радиотелескопе РТ-22 ФИАН в Пушино объединенными усилиями радиоастрономов ФИАНа и ИРЭ АН СССР. Удачным обстоятельством было то, что в это время на радиотелескопе находился приемник для волны 1,35 см, разработанный в ИРЭ для исследований излучения водяного пара в атмосфере Земли.

В результате наблюдений был получен профиль линии водяного пара от источника W 49 [66]. В последующих наблюдениях был получен также профиль линии от источника H_2O в туманности Ориона. Измерения подтвердили мазерную природу излучения линии 1,35 см, ее очень большую интенсивность и изменчивость.

После первых же наблюдений 1969 г. было решено создать на РТ-22 комплекс постоянной аппаратуры для волны 1,35 см, включающий в себя высокочувствительный радиометр с квантовым парамагнитным усилителем, эффективную систему облучения и систему стабилизации частоты гетеродина. Осуществление этой программы, как и ранее, проводилось совместными усилиями ФИАНа и ИРЭ АН СССР. Для разработки КПУ был привлечен коллектив, руководимый В.Б. Штейншлейгером, который до этого успешно разработал КПУ для волны 8 мм.

Одновременно в 1969—1970 гг. была принята программа создания на основе радиотелескопов РТ-22 ФИАН и РТ-22 КрАО интерферометра Пушино—Крым для волны 1,35 см для проведения исследований источников H_2O методом сверхдальней интерферометрии (подробно об этом см. гл. 1).

После создания комплекса аппаратуры для волны 1,35 см, а также завершения программы по автоматизации исследований на РТ-22 ФИАН наблюдения в линии H_2O возобновились на новом качественном уровне. Эти наблюдения стали проводиться в содружестве с ГАИШ, сотрудники которого установили на РТ-22 специально разработанный для исследований линии H_2O 96-канальный анализатор спектра с разрешением 7,5 кГц [43]. По инициативе ГАИШ на РТ-22 была поставлена программа систематических наблюдений большой группы источников H_2O , включающей 24 мазерных источника и 24 долгопериодических переменных звезды типа Миры Кита.

Уже в первые 3 года осуществления программы был получен ряд ценных сведений о характере излучения исследованных источников. Результаты наблюдений нескольких долгопериодических источников указали на явную корреляцию их излучения в линии H_2O с излучением в ИК- и в видимом диапазонах; при этом максимумы излучения в линии H_2O запаздывали относительно максимумов визуальной яркости звезды на 0,1—0,2 периода [67]. В излучении источников H_2O , связанных с областями звездообразования, довольно отчетливо выделились две фазы: спокойное состояние, во время которого происходят медленные изменения амплитуд деталей профиля линии, и активная фаза, для которой характерны быстрые изменения амплитуды отдельных пиков и появление в профиле новых деталей. В период вспышек интенсивность излучения источников H_2O этого типа увеличивалась в десятки раз и более [68].

В 1981 г. наблюдения источников H_2O были начаты на радиотелескопе РАТАН-600. Были измерены параметры компонент линии в источнике W 49 и Орион А и обнаружено, что при вспышке в Орионе сильно изменилась лучевая скорость вспышки, а ширина линии увеличилась [69].

Радиолиния H_2CO . В декабре 1978 г. на радиотелескопе РАТАН-600 были начаты первые и единственные в нашей стране наблюдения радиолинии межзвездного формальдегида на волне 6,2 см, обнаруженной ранее в США [70]. В феврале следующего года был проведен цикл наблюдений линии поглощения H_2CO в радиоисточнике Стрелец В2 и получены оригинальные данные. Высокое разрешение радиотелескопа позволило детально изучить кинематику облака H_2CO в этом интереснейшем молекулярном комплексе. Было обнаружено, что ядро этого комплекса диаметром 10 пк сжимается, и, следовательно, комплекс в своей внутренней части нестационарен [71]. Эти особенности кинематики позволили построить динамическую модель эволюции молекулярного комплекса Стрелец В2 и связать его с компактными областями Н II [72].

Исследование процессов звездообразования с помощью молекулярных радиолиний. Области звездообразования, как правило, содержат

много пыли, поглощающей излучение в оптическом диапазоне. Сведения о физических условиях в этих областях и протекающих там процессах могут быть получены поэтому только с помощью радиоизлучения, и в первую очередь через спектральные радиолинии молекул, находящихся в газопылевых облаках.

По завершению создания на радиотелескопе РТ-22 ФИАН автоматизированного спектрального комплекса [43], существенно расширившего возможности инструмента в исследовании радиолиний, на нем были начаты программы наблюдений радиолинии $J=4 \rightarrow 3$ молекулы цианацетилена HC_3N [73]. Радиолинии этой молекулы, весьма обильной в космосе, очень удобны для исследования физических условий в молекулярных облаках. Наибольший интерес здесь представляют темные холодные газопылевые облака, в которых предположительно начинаются процессы звездообразования. Высокое спектральное разрешение комплекса РТ-22 (до $2 \cdot 10^{-7}$) позволило при наблюдениях линии $J=4 \rightarrow 3$ в темных облаках ТМС-1, ТМС-2 и др. выделить отдельные компоненты сверхтонкой структуры линии. Это дало возможность из наблюдений только одной линии получить данные о температуре, плотности, скоростях внутренних движений в исследованных областях звездообразования. Было найдено, в частности, что объекты находятся на грани устойчивости, в них могут образовываться маломассивные звезды [74].

Большое пространственное разрешение РТ-22 на волне 8 мм позволило провести картирование молекулярных облаков в линии $J=4 \rightarrow 3$ и, таким образом, выделить сгустки плотности, в которых как раз и происходит звездообразование [75].

В Горьковском НИРФИ и Институте прикладной физики (ИПФ) АН СССР под руководством А.Г. Кислякова была осуществлена комплексная программа по поиску протозвездных конденсаций с проведением наблюдений в непрерывном спектре и в радиолиниях молекул. При осуществлении программы был использован как советский радиотелескоп РТ-22 КрАО, так и зарубежные инструменты [76].

Для наблюдений космического радиоизлучения в интервале длин волн 2—4 мм был разработан автоматизированный аппаратный комплекс [77]. Комплекс позволяет получать спектры линий с частотным разрешением $\sim 0,3$ МГц. В состав комплекса входит криогенный радиометр 3-миллиметрового диапазона с шумовой температурой ~ 400 К, созданный ИПФ АН СССР совместно с коллективом Л.Г. Гасанова.

Первые в нашей стране успешные наблюдения межзвездных линий в диапазоне коротких ($\lambda \lesssim 4$ мм) миллиметровых радиоволн проведены НИРФИ на РТ-22 КрАО (линия $\text{HCN } J=1 \rightarrow 0$) в 1976 г. [76]. Линия $\text{CO } J=1 \rightarrow 0$ наблюдалась впервые на РТ-7,5 МВТУ им. Н.Э. Баумана с помощью аппаратного комплекса ИПФ АН СССР в 1980 г.

В результате наблюдений на РТ-22 КрАО в диапазоне коротких миллиметровых радиоволн было обнаружено излучение в непрерывном спектре от нескольких темных туманностей Галактики. В направлении этих источников с помощью 11-метрового радиотелескопа Национальной радиоастрономической обсерватории (НРАО) (США) проведены ис-

следования радиотелескопов изотопов окиси углерода (CO , ^{13}CO и C^{18}O) [78, 79], переходы которых оказываются в диапазоне длин волн 2,6—2,8 мм. Установлена связь источников непрерывного излучения с молекулярными облаками в некоторых темных туманностях. Особенно интересным объектом оказалась туманность L673. В направлении ее обнаружена линия поглощения формальдегида (переход $2_{11} \rightarrow 2_{12}$, $\lambda = 2$ см, РТ-43 НРАО), которая имела более сильную концентрацию к центру источника, чем линия CO [76]. Аналогичный результат был получен по наблюдениям в этом источнике линии аммиака NH_3 (линии (1,1) и (2,2), $\lambda = 1,25$ см), проведенным на 100-метровом радиотелескопе ФРГ [80]. Сверхтонкая структура линий HCN в L673, как выяснилось из наблюдений на 20-метровом радиотелескопе в Онсала, обладает аномалией, типичной для холодных оптически плотных объектов [81]. Таким образом, туманность L673 обладает всеми признаками протозвездной конденсации, находящейся на ранней стадии развития. Наблюдения в нескольких молекулярных линиях дают возможность построить модель конденсации.

В ходе исследований по программе, предложенной совместно НИРФИ и НРАО на РТ-11 США, было обнаружено молекулярное облако цианамида в центре Галактики [82]. Эта молекула играет ключевую роль в предбиологической химии.

В последнее время на РТ-22 КРАО сотрудниками ИФФ АН СССР выполнен обзор темных туманностей и зон Н II Галактики в линиях CO , HCN и HCO^+ . Наиболее полон обзор в линии HCN [83]. Обнаружение линий HCN дает возможность оценить нижний предел плотности H_2 в области формирования линии. Этот предел примерно на 2 порядка выше минимальной плотности H_2 , необходимой для возбуждения линии CO . Поэтому обзор в линии HCN существенно отличается от уже известных обзоров в линиях CO тем, что он дает информацию о более плотных фрагментах облаков, интересных с точки зрения звездообразования.

За 36 лет, прошедших с момента обнаружения первой галактической радиотелескопической линии водорода на волне 21 см, — космическая радиоспектроскопия превратилась в одно из наиболее актуальных и быстро развивающихся направлений радиоастрономии. В настоящее время в спектре космического излучения зарегистрировано более 1000 радиотелескопических линий, принадлежащих различным атомам и молекулам, число обнаруженных радиотелескопических линий продолжает быстро расти.

С помощью наблюдений спектральных радиотелескопических линий сейчас получается основное количество информации о межзвездной среде, областях звездообразования, об эволюционных процессах. Одновременно, как это ясно из изложенного выше, космическая радиоспектроскопия представляет весьма благоприятную возможность для изучения элементарных физических процессов, которые невозможно исследовать в лабораторных условиях.

Советская наука внесла в развитие этого направления заметный вклад.

Быстрый прогресс в средствах приема радиотелескопических линий, особенно в миллиметровом диапазоне, где находится наибольшее количество враща-

тельных переходов молекул, создание новых крупных радиотелескопов этого диапазона, в первую очередь советского прецизионного 70-метрового радиотелескопа РТ-70 [84], должны обеспечить дальнейшее развитие этого направления, познание новых важнейших закономерностей природы.

Глава 3

РАДИОАСТРОНОМИЯ И КОСМОЛОГИЯ

Космология — раздел астрофизики, изучающий строение и развитие Вселенной в целом, имеет большое значение не только для астрономии, но и для всего естествознания. Советские ученые имеют в этом разделе науки весомые результаты.

3.1. ПОДСЧЕТЫ РАДИОИСТОЧНИКОВ И ФОНОВОЕ РАДИОИЗЛУЧЕНИЕ ВСЕЛЕННОЙ

Развитие радиоастрономии к концу 50-х годов дало астрономам новый канал для получения космологической информации. Простая экстраполяция свойств близких радиоисточников на самые слабые, доступные наблюдениям на первых радиотелескопах, указывала на то, что многие из них находятся на очень больших (космологических) расстояниях. Так как расстояния до большинства радиоисточников не были известны, то вполне закономерно было ожидать, что некоторые выводы о строении Вселенной могут быть получены из анализов подсчетов числа радиоисточников N в зависимости от измеряемого потока излучения S и наблюдения интенсивности фонового нетеплового радиоизлучения¹.

В случае однородного распределения стационарных источников в евклидовом пространстве зависимость N от S имеет следующий вид: $N(S) \propto S^{-3/2}$. В расширяющейся Вселенной в зависимости от типа космологической модели и при эволюционирующих источниках эта зависимость от потока будет иная.

Первые подсчеты, проведенные М. Райлом и П. Шеером [2], основанные на втором кембриджском каталоге радиоисточников (длина волны 3,7 м), содержавшем 1936 источников, действительно показали более крутую зависимость: $N(S) \propto S^{-k}$, где $k = 1,8$ [3, 4]. Этот "эффект Райла" был примерно в то же время подтвержден измерениями на других частотах [5].

Первый важный для космологии вывод, который был сделан из анализа этих подсчетов, — несостоятельность модели стационарной Вселенной, согласно которой свойства Вселенной, усредненные по достаточно большим объемам пространства и временным интервалам, не меняются с течением времени. Наблюдения показали,

¹ Теоретические аспекты сравнения наблюдений с предсказаниями космологии читатель может найти в книге [1].

что если даже принять для радиосветимости источников минимально допустимые значения, то наблюдаемое число источников в интервале потоков $0,5 \cdot 10^{-26} < S < 2 \cdot 10^{-26}$ Вт/(м²·Гц), почти в 3 раза больше, чем предсказывалось теорией стационарной Вселенной. С учетом же функции радиосветимости, полученной по отождествленным радиоисточникам, наблюдаемое число более чем в 10 раз превышает предсказанное теорией стационарной Вселенной. Иными словами, данные наблюдений прямо указывают на сильную эволюцию радиоисточников в прошлом, что противоречит идее стационарной Вселенной.

Объяснение этого эффекта должно быть дано в рамках теории расширяющейся Вселенной, созданной советским математиком А.А. Фридманом. В теории Фридмана излучение от удаляющихся от нас вследствие расширения Вселенной источников испытывает красное смещение длин волн: $Z = (\lambda_{\text{наб}} - \lambda_{\text{ист}}) / \lambda_{\text{ист}}$.

Эволюционное истолкование "эффекта Райла" указывает на то, что большинство радиоисточников имеет красные смещения порядка нескольких единиц и что в более раннюю эпоху расширения Вселенной число сильных радиоисточников было в сотни раз больше, чем в настоящее время. В дальнейшем дифференциальные и интегральные подсчеты радиоисточников проводились на различных частотах, вплоть до потоков $S = 0,01 \cdot 10^{-26}$ Вт/(м²·Гц) [6—8], причем имеется хорошее согласие подсчетов источников на различных частотах. Наблюдаются крутой спад в области ярких источников, что свидетельствует, как уже сказано, о большом количестве сильных радиоисточников в прошлом при Z порядка нескольких единиц, и явно выраженная пологость в диапазоне слабых потоков, для которых $k = 0,8$. Такое изменение формы зависимости $N(S)$ для слабых источников ($S < 10^{-26}$ Вт/(м²·Гц)) указывает на отсутствие сильных радиоисточников в далеком прошлом или по крайней мере прекращение роста числа сильных радиоисточников по мере удаления в прошлое.

Таким образом, важнейшее заключение состоит в том, что указанные радионаблюдения выявили сильнейшую эволюцию радиоисточников во Вселенной.

В настоящее время основной акцент делается на наблюдения и подсчеты очень слабых радиоисточников на различных частотах. Как выяснилось, основной вклад в наблюдаемую зависимость $N(S)$ при малых потоках уже дают близкие слабые радиоисточники. В зависимости от частоты наблюдений это либо обычные и активные галактики, либо особый класс близких слабых радиоисточников.

В частности, результаты подсчетов радиоисточников, выполненные К.П. Соколовым [9, 10] по данным, полученным на радиотелескопе УТР-2 на частоте 25 МГц, показали, что если при больших потоках ($S > 10^{-25}$ Вт/(м²·Гц)) основной вклад в зависимость $N(S)$ дают далекие мощные, быстро эволюционирующие радиоисточники (в основном квазары), то при малых потоках ($10^{-26} S < 10^{-25}$ Вт/(м²·Гц)) основной вклад в $N(S)$ дают относительно близкие слабые радиоисточники с крутыми спектрами. Таким образом, роль космоло-

гических эффектов в формировании вида функции $N(S)$ в области очень слабых потоков незначительна.

С подсчетами радиоисточников связана проблема фонового радиоизлучения — совокупного излучения всех радиоисточников во Вселенной. Ожидаемая яркостная температура фонового радиоизлучения также чувствительна к выбору космологической модели и к эволюции радиоисточников, так как определяется зависимостью $N(S)$ в области малых потоков.

В частности, для того, чтобы избежать парадокса Ольберса², необходимо, чтобы $k < 1$, а в случае конечного числа радиоисточников во Вселенной должно быть $k = 0$.

Выбор конкретной космологической модели по данным подсчетов радиоисточников и фоновому радиоизлучению на современном этапе неоднозначен, так как требует знания характера эволюции плотности числа радиоисточников в пространстве и эволюции их радиосветимости, т.е. количественных теорий происхождения и эволюции радиоисточников (обсуждение см. в [11]). Таким образом, подсчеты зависимости N от S дают важные сведения об эволюции радиоисточников и малочувствительны к выбору космологической модели. Из последних наблюдательных работ этого направления можно отметить работу [12].

3.2. ЗАВИСИМОСТЬ УГЛОВЫХ РАЗМЕРОВ РАДИОИСТОЧНИКОВ ОТ КРАСНОГО СМЕЩЕНИЯ; РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОСТОЯННОЙ ХАББЛА

Повышение разрешающей способности радиотелескопов и использование радиоинтерферометров позволило определить угловые размеры многих радиоисточников и отождествить их с оптическими объектами — радиогалактиками и квазарами. Это позволило проанализировать еще один космологический тест — зависимости угловых размеров θ от красного смещения и потока. Эти зависимости разные для различных моделей, и была надежда, что сравнение теории с наблюдениями позволит получить сведения о структуре Вселенной.

Сравнение распределения по диаметрам радиоисточников в каталогах 3CR и 5C [13] привело к выводу о существовании больших диаметров для малых S , что, казалось бы, подтверждало предсказания релятивистских моделей Вселенной. В действительности при таких подсчетах большую роль играют эффекты селекции, поскольку при больших Z наблюдаются объекты с большими светимостями, которые в среднем имеют большие размеры. В работах [14, 15] впервые проанализирована зависимость $\theta(Z)$. В общей сложности использовались выборки почти 90 радиогалактик и квазаров. Была

²Так называют вывод, согласно которому в бесконечной стационарной Вселенной, заполненной незволюционирующими источниками, яркость неба должна равняться поверхностной яркости источников.

обнаружена тесная корреляция углового размера с наблюдаемым красным смещением.

В статической евклидовой модели для радиоисточников с постоянными линейными размерами ожидаемая зависимость такова: $\theta \propto 1/Z$. Для закрытых космологических моделей при $Z > 1$ должно наблюдаться увеличение угловых размеров с ростом Z . Наблюдения показали избыточное количество радиоисточников с малыми угловыми размерами при $Z \approx 1$. В общем это противоречит любым космологическим моделям. Результаты наблюдений можно объяснить, предположив эволюцию линейных размеров; в прошлом размеры радиоисточников были меньше. Таким образом, и здесь основным, по-видимому, является эволюционный эффект.

В дальнейшем, в 70-е годы, массовые определения угловых размеров радиоисточников по мерцанию их радиоизлучения на неоднородностях межпланетной среды позволили повысить статистику зависимости $\theta(Z)$.

Наблюдения близких радиоисточников показали, что линейные расстояния между компонентами большинства двойных радиоисточников составляют около 200 кпк, поэтому они могут служить эталонами длины. Учитывая это, в работе [16] была проанализирована зависимость углового расстояния между компонентами двойных радиоисточников от Z . Была обнаружена тенденция роста числа радиоисточников с большими угловыми расстояниями между компонентами при $Z > 1$ (см., например, [14]). Но снова неопределенность в характере систематической эволюции расстояний между компонентами двойных радиоисточников не позволяет однозначно выбрать космологическую модель.

Наблюдения можно согласовать с теорией, если предположить, что линейные расстояния между компонентами эволюционируют по закону $l = l_0(1+Z)^n$, где $-2 < n < -1$. К аналогичному выводу приводит зависимость угловых размеров источников от потока S , так как S зависит от расстояния до источника [17, 18]. Следует отметить, что в наблюдаемые зависимости $\theta(Z)$ и $\theta(S)$ заметный вклад может дать неоднородное распределение вещества во Вселенной [19].

Таким образом, с использованием данных радиоастрономии классические тесты космологических моделей могут привести к положительному результату, дающему сведения о структуре Вселенной, только при надежном установлении строения радиоисточников и эволюции их во времени на больших промежутках.

Радиоастрономические методы внесли вклад в классическую задачу звездной и внегалактической астрономии — определение постоянной Хаббла. По наблюдениям близких галактик была установлена корреляция между шириной линии излучения нейтрального водорода на волне 21 см и абсолютной звездной величиной спиральных и линзовидных галактик (соотношение Тулли—Фишера) [20, 21]. Наблюдения этой линии в галактиках, удаленных на расстояния до 40 Мпк, позволили получить независимую от других методов оценку значения постоянной Хаббла, равную $H = 100$ км/(с·Мпк); анализ и критику этих наблюдений можно найти в обзорах [22, 23].

3.3. РАДИОАСТРОНОМИЯ И ОБНАРУЖЕНИЕ РЕЛИКТОВОГО ФОНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Выдающимся вкладом радиоастрономии в космологию является открытие в 1965 г. микроволнового внегалактического фонового излучения, получившего название (по предложению И.С. Шкловского) реликтового излучения, с температурой около 3 К. А. Пензиас и Р. Вильсон [24] открыли это излучение, когда они проводили астрономические измерения с рупорной антенной диаметром 6,1 м, предназначенной для приема сигналов, отраженных от спутника "Эхо". Измерения шумовой температуры в направлении на зенит на частоте 4080 Мгц ($\lambda = 7,35$ см) дало значение на 3,5 К больше ожидаемого. В пределах ошибок наблюдений этот избыток температуры оказался изотропным, неполяризованным и не зависящим от сезонных условий (измерения проводились с июля 1964 г. по апрель 1965 г.).

Полная антенная температура, измеренная в зените, 6,7 К; из них $2,3 \pm 0,3$ К было обязано излучению атмосферы, омические потери в приемной аппаратуре составили $0,8 \pm 0,4$ К, вклад излучения Земли в боковых лепестках антенны $< 0,1$ К. Таким образом, температура изотропного микроволнового фона оказалась равной $3,5 \pm 1$ К.

Истолкование этих наблюдений как открытие реликтового излучения было сделано Р. Дике, П. Пиблсом, П. Роллом, Д. Уилкинсом [25]. За обнаружение реликтового излучения Пензиасу и Вилсону в 1978 г. была присуждена Нобелевская премия.

История открытия реликтового излучения весьма интересна. Еще в середине 40-х годов Г. Гамов [26] высказал идею о том, что в начале расширения Вселенная была горячей. В дальнейшем эта теория горячей Вселенной развивалась в работах [27—31] и др. (см. обзор [1]). Уже в первых работах Г. Гамова, Р. Альфера, Р. Хермана по теории горячей Вселенной было отмечено, что следствием большой температуры вещества в начале расширения Вселенной должно быть в наше время электромагнитное излучение с равновесным спектром, соответствующим температуре в несколько кельвин. К сожалению, до 60-х годов никто сознательно не пытался искать это излучение. Сами авторы теории, по-видимому, считали, что это излучение не может быть открыто, так как его поток на Земле того же порядка, что и поток излучения от звезд и поток энергии космических лучей.

За год до открытия реликтового излучения в 1964 г. была опубликована теоретическая работа А.Г. Дорошкевича и И.Д. Новикова [32], в которой было впервые показано, что реликтовое излучение может быть наблюдаемо в миллиметровом и сантиметровом диапазонах длин волн. Согласно [32], в этом диапазоне планковский спектр реликтового излучения на несколько порядков интенсивнее суммарного излучения от радиоисточников. В результате этой работы стала ясной возможность решающего опыта — наблюдения реликтового излучения, от результатов которого зависел выбор между моделями горячей и холодной Вселенной. Однако эта работа до открытия Пензиаса и Вилсона не была замечена наблюдателями.

С другой стороны, теоретики не знали до 1965 г. о существовании наблюдений в радио- и оптическом диапазонах, которые были выполнены задолго до Пензиаса и Вилсона и могли привести к открытию реликтового излучения.

Еще в 1941 г. Мак-Келар, анализируя линии поглощения, вызываемые в спектре звезды ξ Змееносца межзвездными молекулами CN, нашел, что температура возбуждения этих молекул равна 2,3 К [33]. Это было первое наблюдательное проявление реликтового излучения, однако правильно истолкованное только в 1966 г. И. Шкловским, Дж. Филдом и Р. Тадеушем.

В 1956 г. Т.А. Шмаонов под руководством С.Э. Хайкина, проводя в ГАО (Пулково) измерения температуры фонового излучения на волне 3,2 см [34], получил значение температуры, равное 4 К, не зависящей от зенитного расстояния вплоть до $Z=30^\circ$ и постоянной во времени. Хотя точность измерения была невелика, эта температура оказалась на 2 К превышающей возможную эффективную температуру тропосферы. Теоретики ничего не знали об этих наблюдениях, и внимание на них было обращено только в 1983 г.

После работы [24] последовали серии наблюдений реликтового фона в различных участках дециметрового, сантиметрового и миллиметрового диапазонов. Отметим пионерскую работу советских авторов [35] (обзор работ см. в [36]). Средневзвешенное значение всех радиометрических измерений температуры реликтового излучения было получено равным $2,72 \pm 0,08$ К. В диапазоне $0,8 < \lambda < 21$ см спектральная плотность энергии реликтового излучения $\rho(\nu) \propto \nu^\alpha$, где $\alpha = 1,937 \pm 0,037$, т.е. отличие от спектра абсолютно черного тела в рэлей-джинсовской области не превышает 2%.

Для окончательного доказательства "чернотельной" природы реликтового излучения были необходимы прямые наблюдения в районе максимума и в виновской области планковского спектра, в диапазоне $\lambda < 1$ мм. Однако в этом диапазоне велико поглощение атмосферы, поэтому наблюдения необходимо было проводить на больших высотах или за пределами земной атмосферы. Кроме того, в отличие от длинноволнового радиодиапазона измерение фонового излучения в миллиметровом и далеком инфракрасном диапазонах требует глубокого охлаждения не только приемника излучения, но и всей антенно-волноводной системы. Это связано со спецификой работы чувствительных приемников и сильной зависимостью поглощения антенны от температуры.

В миллиметровом диапазоне реликтовое излучение наблюдали и окончательно подтвердили его чернотельную природу группа ученых из Лос-Аламосской исследовательской лаборатории [37]. Они в мае 1971 г. осуществили запуск ракеты на высоту 185 км с болометром, погруженным в жидкий сверхпроводящий гелий с температурой 1,5 К. Температура реликтового излучения, измеренная ими в диапазоне 0,8—6 мм, оказалась равной $3,1^{+0,5}_{-2,0}$ К.

В принципе термическая история процессов в ранней Вселенной может привести к некоторым отклонениям спектра реликтового

излучения от планковского (см., например, [38, 1]). Но надежно такие отклонения пока не обнаружены.

Первые наблюдения показали высокую степень изотропии реликтового излучения в диапазоне 0,3—50 см, причем $\Delta T/T < 10^{-3}$ в любых временных и угловых масштабах.

Вся эта совокупность наблюдательных фактов говорит о малости отклонений от идеализированной фридмановской картины эволюции Вселенной, указывает на реликтовое происхождение микроволнового фонового излучения.

Следует отметить, что по оптическим наблюдениям разбегания галактик изотропия Вселенной определяется с погрешностью всего 20%, в то время как по измерениям реликтового излучения она подтверждается с погрешностью 0,1%.

3.4. ИЗМЕРЕНИЕ АНИЗОТРОПИИ РЕЛИКТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Наблюдение свойств реликтового излучения дает астрофизикам возможность получения важнейшей космологической информации. В первую очередь это относится к наблюдениям анизотропии этого излучения. Согласно модели горячей Вселенной, реликтовое излучение изотропно в системе отсчета, сопутствующей в среднем всей материи во Вселенной. Поэтому движение наблюдателя по отношению к этой системе должно приводить к анизотропии распределения реликтового излучения вследствие эффекта Доплера [39] (так называемая дипольная составляющая анизотропии). В связи с этим в работах [40, 41] было показано, что в ожидаемую анизотропию реликтового излучения существенный вклад вносит скорость вращения Солнца вокруг центра Галактики, движение Галактики относительно центра масс Местной системы и движение Местной системы относительно центра скопления галактик в Деве. Кроме этого, измерение скорости движения Солнца по отношению к системе, связанной с изотропным реликтовым излучением, и сравнение ее со скоростью, полученной по отношению к далеким галактикам, дали бы ценную космологическую информацию о распределении крупномасштабных неоднородностей вещества во Вселенной и его движении.

Первый положительный результат по измерению анизотропии реликтового излучения, связанного с движением Солнца, был получен Э. Конклином на волне $\lambda = 3,75$ см [42]. Он получил амплитуду изменения температуры реликтового излучения с суточным периодом $\Delta T = (1,9 \pm 0,8) \cdot 10^{-3}$ К. Для того чтобы уменьшить влияние атмосферы, в работе [43] проводились измерения на волне 3 см на радиометре, установленном на баллоне. Указанные измерения дали одинаковые результаты. Полная скорость движения Солнца v по отношению к полю реликтового излучения составляет 320 ± 80 км/с и направлена в точку с координатами $\alpha = 10,5^h \pm 4^h$, $\delta = -30^\circ \pm 20^\circ$. Полученное значение скорости неплохо согласовывалось с оценками по наблюдениям распределения красных смещений ближайших галактик. Это означало, что наше локальное сверхскопление обладает

чрезвычайно малой пекулярной скоростью (≤ 200 км/с) по отношению к полю реликтового излучения.

В настоящее время имеются довольно многочисленные измерения дипольной составляющей анизотропии реликтового излучения, обзор первых из них дан в работе [44]. Измеряемые значения дипольной составляющей $\Delta T/T$ дают важную космологическую информацию (см., например, [45]).

Новейшее значение дипольной составляющей анизотропии реликтового излучения в диапазоне 8 мм получено в советском эксперименте "Реликт" [46], впервые выполненном на высокоапогейном спутнике "Прогноз-9". Оно соответствует скорости движения Солнца относительно реликтового излучения 280 км/с.

Измерение анизотропии реликтового излучения во всех угловых масштабах чрезвычайно важно для космологии (см. [47, 48]).

Во-первых, эти измерения дают сведения о физике ранней Вселенной, так как непосредственно несут информацию о первичных неоднородностях, которые зародились в начале космологического расширения и развитие которых привело к образованию крупномасштабной структуры Вселенной.

В настоящей время теории ранних стадий эволюции Вселенной дают определенные предсказания о спектре первичных флуктуаций материи, а значит, и об ожидаемых угловых флуктуациях интенсивности реликтового излучения. Сравнение теории с наблюдениями является ключевым тестом для этих теорий.

Во-вторых, угловое распределение флуктуаций реликтового излучения содержит также сведения об общей кривизне пространства, а значит, и об общей плотности материи во Вселенной, включая труднонаблюдаемые, т.е. практически не излучающие и не поглощающие формы.

Среди первых попыток измерения мелкомасштабной анизотропии реликтового излучения отметим измерения [49] с угловым разрешением $1^\circ \times 12'$ на $\lambda = 2,8$ см и измерения [50] на $\lambda = 3,2$ см с угловым разрешением $15^\circ \times 15^\circ$. В этих угловых масштабах никаких отклонений от изотропии с точностью $\Delta T/T = 10^{-3}$ обнаружено не было.

В настоящее время чувствительность измерений заметно возросла, но ни в каких масштабах до сих пор не обнаружены с уверенностью угловые вариации $\Delta T/T$ (кроме дипольной составляющей).

Интересный эффект, приводящий к угловым флуктуациям реликтового излучения, был рассмотрен Я.Б. Зельдовичем и Р.А. Сюняевым [51]. При рассеянии квантов реликтового излучения на электронах горячего газа в скоплениях галактик частота квантов увеличивается. Для рэлей-джинсовской области спектра это приводит к уменьшению интенсивности. Таким образом, при наблюдении реликтового излучения в сантиметровом области спектра в направлении на скопление с горячим газом должно наблюдаться понижение его интенсивности. В принципе сопоставление наблюдений данного эффекта, получившего название эффекта Зельдовича—Сюняева, и наблюдений рентгеновского излучения горячего газа в скоплениях при определенной модели распределения газа может дать

сведения о линейных размерах облака газа, а значит, может стать еще одним способом измерения внегалактических расстояний.

Обзор результатов измерений мелкомасштабных (от угловых минут до градусов) угловых флуктуаций $\Delta T/T$ можно найти в [52]. Такие измерения особенно важны для проверки теорий ранней Вселенной. Точность измерений здесь уже превысила $\delta T/T = 10^{-4}$.

Наилучшее ограничение на возможное значение крупномасштабной квадрупольной составляющей анизотропии реликтового излучения следует из данных упоминавшихся наблюдений [46]: $(\Delta T/T)_{\text{квад}} < 2 \cdot 10^{-5}$.

Обсуждение этих результатов можно найти в цитированных выше работах. При этом получается целый ряд важных сведений о физике ранней Вселенной. Здесь мы отметим только один важный вывод. Отсутствие заметных вариаций $\Delta T/T$ в больших угловых масштабах говорит о том, что в масштабах, сравнимых с сегодняшним горизонтом видимости, нет заметных флуктуаций плотности с точностью около 10^{-4} .

Таким образом, исследование реликтового излучения наносит решительный удар по концепции иерархической структуры. В этой концепции предполагается, что галактики образуют скопления, скопления образуют сверхскопления, сверхскопления образуют сверхсверхскопления и т.д., так что в каждом масштабе амплитуда флуктуаций плотности оказывается порядка 1. Этот результат — отсутствие крупномасштабной иерархической структуры Вселенной, полученный по наблюдениям реликтового излучения, почти на два порядка точнее найденного по наблюдениям разбегания галактик.

Если сравнить оптическую и радиоастрономию, то легко видеть, что за последние 30 лет именно бурное развитие радиоастрономии внесло существенный вклад в решение многих космологических проблем. Дальнейшее развитие радиоастрономии в сторону увеличения чувствительности и разрешающей способности радиотелескопов, набора статистического материала наблюдений и построения адекватной теории строения и эволюции радиоисточников позволит в конце концов определить конкретную космологическую модель Вселенной и изучить физику процессов в начале ее расширения. Чрезвычайно важным при этом являются проводимые сейчас и планируемые в будущем наблюдения с борта космических аппаратов за пределами земной атмосферы.

Радиоастрономия уже сейчас предлагает ряд принципиально новых экспериментов, которые помогут существенным образом продвинуться в нашем понимании строения и эволюции Вселенной. Это прежде всего связано с развитием методов космической интерферометрии. Идея одного из экспериментов приведена в [53] (см. также [54]). Она основана на измерении кривизны волнового фронта излучения от далекого компактного радиоисточника с помощью трех радиотелескопов, разнесенных в пространстве на расстояние порядка астрономической единицы. При базе $D = 1$ а.е. и измерениях на длине волны $\lambda = 1$ см можно определять расстояния вплоть до $R \approx 100 (D^2/\lambda) \approx 10^9$ пк. Такие измерения позволили бы непосред-

ственно определить кривизну трехмерного пространства и решить многие принципиальные задачи космологии.

Таким образом, разносторонняя информация, полученная радиоастрономическими методами как советскими, так и зарубежными учеными, существенно углубила наши знания о строении и эволюции Вселенной.

Глава 4

РАДИОИЗЛУЧЕНИЕ ЛУНЫ

4.1. ТЕОРИЯ И ИЗМЕРЕНИЯ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ ЛУНЫ

Радиоизлучение Луны впервые было измерено за рубежом на волне 1,25 см [1]. В этой работе определялась средняя по диску Луны яркостная температура и ее изменение в течение лунного цикла. Как и следовало ожидать, яркостная температура изменялась со временем в соответствии с фазами Луны практически синусоидально около некоторой средней величины, причем максимум излучения запаздывал относительно максимума нагрева (наступал позднее полнолуния). Амплитуда колебаний радиояркостной температуры составляла примерно пятую часть от амплитуды колебания температуры, измеренной на ИК-волнах. Этот эффект был объяснен тем, что радиоизлучение обусловлено толстым слоем вещества, т.е. идет преимущественно из некоторой глубины, на которой температурные колебания существенно слабее, чем на поверхности. Глубина излучающего слоя, очевидно, соответствует той, при которой оптическая толщина равна единице. В работе на основе этого была дана теория теплового радиоизлучения Луны в предположении диэлектрической природы ее вещества в случаях однородной и резко неоднородной двухслойно-пылевой модели строения верхнего покрова. Согласно этой теории, степень уменьшения колебаний радиояркостности определяется соотношением глубины l проникания электромагнитной волны к глубине l_T проникания температурной волны в среду, т.е. величиной $\delta = l/l_T$.

Значение этой работы заключается в открытии того, что радиоизлучение Луны определяется достаточно толстым слоем вещества и несет информацию о физических свойствах слоя.

Однако важность этого факта в полной мере стала ясной лишь позднее, когда были разработаны методы определения свойств вещества Луны по ее радиоизлучению и получены существенные сведения о природе вещества верхнего покрова, которые ранее казались недостаточными.

Через некоторое время после этих первых измерений у нас в Союзе и за рубежом начались интенсивные исследования радиоизлучения Луны на разных волнах и разработка методов определения по этим данным физических условий на Луне, в первую очередь температуры, тепловых и электрических свойств вещества, его структуры и природы.

Впервые радиоизлучение Луны наблюдалось у нас в стране осенью 1951 г. на 4-метровом радиотелескопе на волне $\lambda = 3,2$ см в ФИАНе [2].

Наиболее систематические и комплексные исследования Луны велись в Советском Союзе группой радиофизиков в НИРФИ (г. Горький) начиная с 1950 г. вплоть до 1967 г. Естественно поэтому, что основную часть истории исследований радиоизлучения Луны составляют эти работы.

Первые непрерывные наблюдения радиоизлучения Луны в СССР в течение ряда лунных циклов были проведены в Горьком на радиоастрономической станции "Зименки" на волне 3,2 см в 1952 г. Отдельные измерения на этой же волне и на волне 10 см примерно в этот же период выполнялись в ФИАНе на радиотелескопах диаметром 4 и 7,6 м соответственно [3]. В Горьком измерения проводились на радиотелескопе с диаметром параболической антенны 4 м, установленной на азимутально-вертикальном поворотном устройстве. Чувствительность радиотелескопа была достаточно высокой, позволяя обнаружить относительные изменения температуры Луны в 2—3 К, однако точность абсолютных измерений из-за влияния трудно учитываемых изменений погоды и состояния антенны была существенно хуже. Измерения показали, что колебания интегральной яркостной температуры на этой волне в течение лунного цикла существенно меньше, чем на волне 1,25 см [4]. Это указывало на то, что за излучение на более длинной волне ответственен более толстый слой вещества, или, иначе говоря, глубина проникновения волн 3,2 см существенно больше, чем волны 1,25 см. Это был важный результат с далеко идущими следствиями.

Для дальнейших исследований требовалась разработка более полной теории, в особенности разработка теории интегрального радиоизлучения, что было необходимо для сравнения с измерениями, выполняемыми с помощью радиотелескопов умеренных размеров; требовался учет и ряда других факторов. В соответствии с этим разработана была более адекватная теория радиоизлучения Луны для однородной модели свойств вещества верхнего покрова по поверхности и в глубину [5], в которой учитывалось распределение излучательной способности по диску Луны, а также с известным приближением давалась теория интегрального излучения и влияния шероховатости. Было впервые обращено внимание на существование поляризации радиоизлучения и его распределения по диску Луны, а также поляризации интегрального радиоизлучения, получающегося за счет неравномерного нагрева поверхности Луны. Позднее была дана достаточно точная теория интегрального радиоизлучения Луны [6] и его поляризации [7], а также влияния шероховатости на интенсивность и поляризацию излучения [8].

Теория теплового радиоизлучения Луны рассматривалась для случая однородного слоя в предположении независимости свойств его вещества от температуры. Сначала решалось уравнение теплопроводности для плоского элемента лунной поверхности при заданном изменении инсоляции в течение лунного цикла. Вследствие периодичности нагрева каждое значение температуры поверх-

ности с селенографической широтой ψ и долготой φ могло быть представлено в виде гармонического ряда. Далее полученная температура принималась за граничное условие и решалась задача распространения периодического нагрева внутрь слоя Луны, находилось поле температур в глубине. Наконец, из уравнения переноса определялось радиоизлучение, выходящее наружу. В результате получается довольно простое выражение для распределения радиояркостной температуры по диску Луны в виде

$$T_n(\psi, \varphi, t) = (1 - R)T_0(\psi) + (1 - R) \sum \frac{T_n(\psi) \cos(n\Omega t - \varphi_n - \xi_n)}{(1 + 2\delta_n \cos \gamma' + 2\delta_n^2 \cos^2 \gamma')^{1/2}}. \quad (4.1)$$

Здесь $T_0(\psi)$ — постоянная составляющая температуры данного элемента поверхности; $T_n(\psi)$ — амплитуда n -й гармоники температуры этого же элемента поверхности; $\delta_n = \sqrt{n} \, l/l_T$; $\operatorname{tg} \xi = \delta_n \cos \gamma' (1 + \delta_n \cos^2 \gamma')^{-1}$ — тангенс угла запаздывания максимума соответствующей гармоники радиояркости от фазы гармоники поверхностной температуры; $\gamma'(\psi, \varphi)$ — угол с нормалью падающего изнутри излучения; $R(\psi, \varphi)$ — коэффициент отражения радиоволн; φ_n — фаза гармоники n поверхностной температуры.

Амплитуды колебаний радиояркости для гармоник выше первой на волнах длиннее субмиллиметровых составляют сравнительно небольшую часть первой гармоники и обычно не рассматриваются. Как видно из (4.1), при $\delta \rightarrow \infty$ запаздывание максимума радиоизлучения стремится к 45° ($\xi \rightarrow 45^\circ$), а амплитуда переменной составляющей стремится к нулю. Физически это вполне очевидно. Чем больше толщина радиоизлучающего слоя, тем меньшая доля излучения идет от его части l_T , где имеют место температурные колебания.

При $\delta \approx 0$, что имеет место для ИК-волн, амплитуда колебаний отличается от истинной температуры поверхности на множитель $1 - R$, равный излучательной способности данного участка поверхности для ИК-излучения.

Как уже говорилось, для сравнения с измерениями необходимо было иметь выражение для интегральной радиояркости. При этом, как показали расчеты (см., например, обзор [9]), выражение для интегральной яркостной температуры принимает простой вид:

$$T(t) = (1 - R_\perp)T_0(0)\beta_0(\epsilon) + (1 - R_\perp) \frac{T_1(0)\beta_1(\epsilon, \delta)}{\sqrt{1 + 2\delta + 2\delta^2}} \cos(\Omega t - \xi), \quad (4.2)$$

где ξ — сдвиг фазы первой гармоники для центра диска; ϵ — диэлектрическая постоянная лунного вещества; $R_\perp$ — коэффициент отражения при перпендикулярном падении волн; $\beta_0(\epsilon)$ и $\beta_1(\epsilon, \delta)$ — рассчитанные с помощью ЭВМ коэффициенты усреднения, близкие к единице и слабо зависящие от ϵ и δ . Для второй и высших гармоник коэффициенты усреднения резко падают. Уже вторая гармоника только за счет усреднения оказывается ослабленной в 3 раза по срав-

нению с первой, поэтому в выражении (4.2) более высокие гармоники отброшены.

Таким образом, фазовая зависимость интегрального радиоизлучения Луны оказывается практически синусоидальной. Как видно из выражения (4.2), зная отношение амплитуды переменной составляющей к постоянной, можно найти величину $\delta = l/l_t$, т.е. комбинацию электрических и тепловых параметров; то же самое, но менее точно определяется по запаздыванию фазы. Очевидно, что δ зависит от длины волны λ принимаемого излучения.

В 1956—1958 гг. в ФИАНе впервые были проведены систематические исследования фазового хода радиоизлучения Луны в миллиметровом диапазоне волн. На волне 8 мм с помощью радиотелескопа диаметром 2 м был обнаружен и измерен фазовый ход яркостной температуры Луны, усредненной по большей части ее диска. Было замечено также присутствие второй гармоники [10].

В 1956—1957 гг. в НИРФИ на полигоне "Зименки" были проведены измерения фазовой зависимости радиоизлучения Луны на волне 1,63 см на радиотелескопе диаметром 4 м [11]. В этой работе при сопоставлении данных отечественных и зарубежных измерений на волнах 3,2; 1,6; 1,25; 0,8 см была установлена важная закономерность. Она состоит в том, что отношение $\delta/\lambda = m$ оказывалось независящим от длины волны. Отсюда вытекала пропорциональность глубины проникновения электромагнитных колебаний длине волны: $l = \lambda m/l_t$. Этот важный результат указывал на то, что вещество из которого состоит Луна, — диэлектрик, как это и было принято при разработке теории радиоизлучения Луны. Более того, как мы увидим ниже, это соотношение раскрывает природу вещества верхнего покрова Луны.

Другую комбинацию параметров покрова Луны можно определить, сравнивая измерения температуры ее поверхности в ИК-диапазоне в зависимости от лунаций с расчетом при различных тепловых параметрах слоя.

Таким образом, по ИК-измерениям определяется некоторый параметр $\gamma = (k\rho C)^{-1/2}$, характеризующий тепловую инерцию. Здесь k — коэффициент теплопроводности; ρ — объемная масса; C — теплоемкость вещества поверхности. Первые такие расчеты и определения γ были сделаны еще в 1953 г. [12]. Однако они нуждались в серьезной проверке. Поэтому в НИРФИ были выполнены новые расчеты значений температуры поверхности. Для определения использованы результаты новых измерений излучения Луны в ИК-области [13].

Наиболее эффективно γ определяется по температуре поверхности в лунную полночь (новолуние). Однако измерение этой весьма низкой температуры сильно затруднено и полученные в то время ее значения давали слишком широкие пределы возможных значений γ . Требовалось проведение наблюдений в течение всего лунного цикла. В связи с этим в НИРФИ был разработан телескоп для ИК-волн, на котором были проведены систематические наблюдения за интегральным излучением Луны практически в течение всего лун-

ного цикла и получены данные о величине γ , которые согласовывались с данными радионаблюдений [14].

В НИРФИ был предложен и использован способ измерения γ , основанный на определении отношения амплитуды первой гармоники поверхностной температуры T_1 к постоянной составляющей T_0 , которое получалось экстраполяцией отношения амплитуды первой гармоники к постоянной составляющей радиотемпературы, измеренных на ряде волн. Как видно из (4.2), отношение амплитуды переменной части к постоянной ($T_{1\lambda}/T_{0\lambda}$) при $\lambda \rightarrow 0$ дает искомое значение T_1/T_0 . Другой способ состоял в определении γ по самой величине T_0 , полученной из точных радиоизмерений постоянной составляющей. Однако в этом случае требовалось знание диэлектрической постоянной верхнего покрова.

Определение γ по отношению T_1/T_0 из радиоизмерений имеет то преимущество, что не требует точных абсолютных измерений, так как получается из отношения двух величин, измеренных одновременно в одинаковых условиях.

К концу 50-х годов стало ясно, что для дальнейшего уточнения свойств вещества верхнего покрова необходимо существенно увеличить точность измерений и провести их в широком диапазоне волн, начиная от миллиметровых [15]. Поиски точных методов измерений радиоизлучения Луны привели к идее использования эталонного сигнала для точной калибровки параметров антенны, неопределенность и непостоянство которых вносят главную ошибку в измерении.

Вначале эталонный сигнал составлялся из разности между излучением металлического диска, выложенного на склоне горы, и излучением соседнего с ним участка горы, покрытого поглощающим материалом. Металлический диск имел угловые размеры, равные лунным, был установлен с наклоном 45° к горизонту и поэтому отражал радиоизлучение зенита, известное с большой точностью. Однако яркостная температура диска зависела также и от дифракции на нем окружающего фона излучения гористой местности. Неточность знания дифракции приводила к систематической ошибке. Хотя этот метод, как выяснилось, не позволял вести точные абсолютные измерения по указанной причине, он обеспечивал более высокую стабильность получаемых результатов, что давало возможность точно измерить слабый фазовый ход радиоизлучения на сантиметровых волнах. В результате измерений был впервые обнаружен и измерен фазовый ход радиоизлучения на волне 3,2 см [16].

Вместе с продвижением измерений в длинноволновую область была очевидна необходимость измерений радиоизлучения на коротких миллиметровых волнах, дающих сведения о самом верхнем слое вещества. Эксперимент на миллиметровых волнах считался поэтому решающим для определения модели строения покрова — однородная она или резко неоднородная, как это получалось в работе Пиддингтона и Миннета [1]. В связи с этим в 1959 г. в НИРФИ был разработан первый в мире радиотелескоп на самую короткую тогда волну с $\lambda = 4$ мм, а в 1960 г. в высокогорной экспедиции на Эльбрусе

были проведены первые измерения радиоизлучения Луны на этой волне, зондирующие еще более верхнюю часть покрова, чем прежде [17]. Позднее для исследования самого верхнего слоя вещества была создана серия уникальных радиотелескопов на целый ряд волн короче 4 мм, включая и субмиллиметровые волны. На этих радиотелескопах впервые были проведены исследования радиоизлучения Луны на волне 0,48 см [18] и 0,13 см [19]. Исследования выполнялись в высокогорном районе Восточного Памира на высоте 3860 м над уровнем моря, что исключало существенную часть влияния поглощения этих волн в атмосфере Земли.

Наконец, в 1967 г. впервые в мире были выполнены измерения фазового хода радиоизлучения Луны в субмиллиметровом диапазоне на волне 0,087 см [20].

Измерения фазового хода радиоизлучения в широком диапазоне волн стали решающими для определения модели. На основании всех относительных измерений на волнах 0,4; 0,8; 1,25; 1,63; 3,2 см к 1961 г. было показано, что верхний слой породы Луны достаточно однороден в глубину, по крайней мере до глубины порядка 0,5 м. Резко неоднородное двухслойно-пылевое строение было исключено [21]. Эти измерения позволили подтвердить справедливость соотношения $\delta = m\lambda$ для всего рассмотренного диапазона волн и определить значение $m \approx 2,2 \text{ см}^{-1}$. Отсюда получается

$$l = 2,2\lambda l_r. \quad (4.3)$$

Характер спектра l соответствует спектру силикатных вулканических пород, что вместе с другими соображениями, вытекающими из общих представлений о составе планетных тел, может считаться доказательством тождественности химического и минералогического состава вещества верхнего покрова Луны земным силикатным вулканическим породам. Если это так, то с достаточно большой точностью для всех пород теплоемкость $C = 0,2 \text{ кал/(г} \cdot \text{К)}$. Подставляя в (4.3) известные выражения для l и l_r при $C = 0,2$, получим экспериментальное значение комбинаций четырех параметров:

$$\gamma\rho/\sqrt{\epsilon}\text{tg}\Delta = 6,23 \cdot 10^4. \quad (4.4.)$$

Величина γ определяется из независимых радио- и ИК-измерений, которые приводят к значению $\gamma \approx 700 \div 800$. Таким образом, остаются еще три неизвестных: ϵ , $\text{tg}\Delta$ и ρ .

В ряде зарубежных работ на основании предполагаемой тождественности химического состава земных и лунных пород делались попытки определить ρ , подставляя в формулу (4.4) значения ϵ и $\text{tg}\Delta$ для земных горных пород. Однако это принципиально ошибочно, так как ϵ и $\text{tg}\Delta$ зависят не только от минералогического состава, но главным образом еще и от самой плотности. Интуитивно было ясно, что величина $\rho^{-1}\text{tg}\Delta = l$ не должна зависеть от ρ , а только от химического состава, по крайней мере при ρ , меньшем, чем плотность кристаллического (непористого) состояния ρ_0 . Именно малая плотность должна иметь место на Луне. На это указывало высокое значение $\gamma (\sim 10^3)$, во много раз большее значения для плотных непористых пород ($\gamma \approx 20 \div 50$).

Для исследования указанного вопроса в НИРФИ были организованы и проведены обширные измерения на волне 3,2 см угла потерь у различных пород, взятых из музеев [22]. Путем дробления и пресовки достигались различные плотности в интервале $0,5 \leq \rho \leq 1,25 \text{ г/см}^3$. В результате было показано, что для земных пород в первом приближении имеет место одно и то же значение $\rho^{-1} \text{tg} \Delta$. Подставляя его в (4.4), получим $\epsilon \approx 1,5$, чему, как будет показано ниже, соответствует $\rho \approx 0,5 \text{ г/см}^3$. Столь малая плотность может иметь место только у твердопористого вещества, и широко распространенная за рубежом гипотеза о сплошном пылевом покрове Луны не подтверждается [23,24]. Изложенным выше практически исчерпывалось все, что могли дать относительные измерения. Дальнейшее продвижение в исследовании верхнего покрова было возможно только с применением существенно более точных методов измерения слабого радиоизлучения.

4.2. ТОЧНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ

Новые результаты были получены с применением прецизионного метода измерения радиоизлучения, разработанного в НИРФИ [25]. Метод основан на сравнении радиоизлучения Луны с точно известным радиоизлучением абсолютно черного диска, помещенного во френгоферовой зоне антенны радиотелескопа, т.е. на расстоянии r , большем $2D^2/\lambda$, где D — диаметр радиотелескопа, и на достаточной высоте над горизонтом. Способ получил название "метод искусственной Луны", так как обычно диск имеет видимые от раскрыва радиотелескопа угловые размеры, близкие к угловым размерам Луны. Эталонный сигнал образовывался, когда диск вносился и убирался из поля зрения неподвижного радиотелескопа (из главного лепестка диаграммы антенны).

Обычная методика — "навел—отвел" радиотелескоп — здесь неприменима из-за сильной неоднородности фона радиоизлучения земной поверхности, попадающего в диаграмму антенны. Оказалось, что даже при условии неподвижности радиотелескопа наиболее существенная ошибка метода связана с влиянием радиоизлучения Земли, которое дифрагирует на появляющемся в диаграмме антенны диске и попадает в радиотелескоп, увеличивая эталонный сигнал на неопределенную величину.

Для исключения влияния дифракции фонового радиоизлучения применяется второй эталон в виде отверстия в плоском экране, перекрывающем главный лепесток диаграммы антенны и расположенном там же, где и диск. Отверстие должно точно соответствовать размерам диска. В этом случае эталонный сигнал, образованный излучением черного диска, помещаемого в отверстие, оказывается уменьшенным на величину мощности дифрагированного в отверстии радиоизлучения фона (Земли, атмосферы). В первом замеры диск в свободном пространстве "тащит" с собой дополнительный дифракционный сигнал, во втором — диск, закрывая отверстие, убирает дифракционный сигнал, уменьшая эффект радиоизлу-

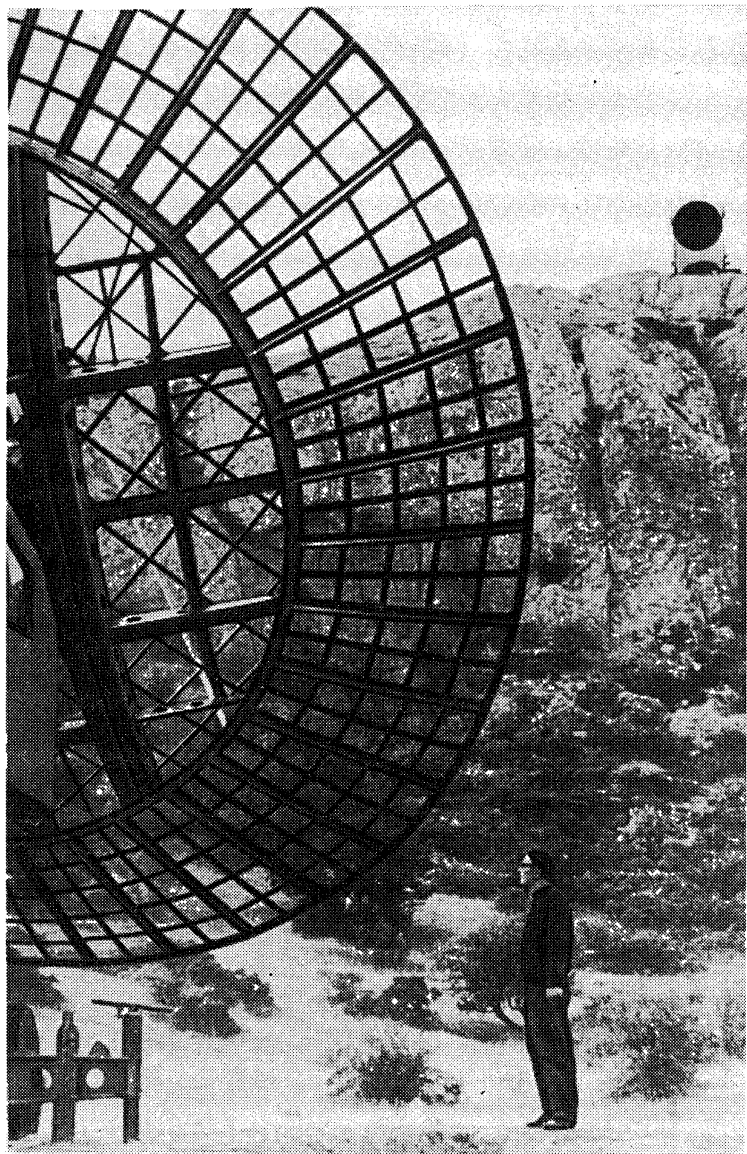


Рис. 4.1. Карадагская радиоастрономическая станция НИРФИ (Крым)

Прием радионизлучения "искусственной Луны" (диаметр диска 5 м) на радиотелескоп с зеркалом диаметром 12 м

чения черного диска на эту величину. Таким образом, в первом за-
мере дифракционный сигнал добавляется к эталонному сигналу, а во
втором, наоборот, от эталонного сигнала вычитается. Поскольку
дифракционные картины диска и отверстия одинаковы (принцип
Бабинне), то и дифракционные мощности равны по величине. Сле-

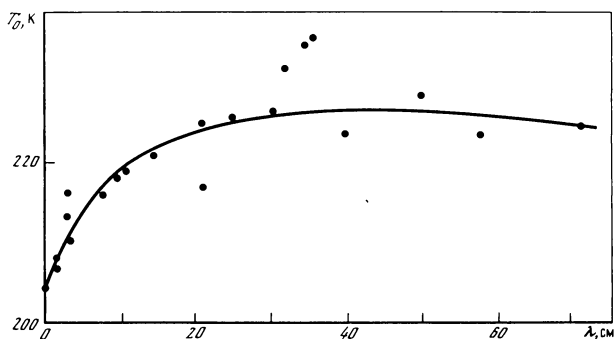


Рис. 4.2. Зависимость от длины волны постоянной составляющей T_0 радиояростной температуры Луны, средней по диску (по результатам [25]; ошибка ± 2 К)

довательно, среднее значение сигналов от свободного черного диска и диска в отверстии оказывается строго равно известному излучению диска.

Позже благодаря применению указанного способа дифракционные ошибки были детально исследованы и найдены условия установки диска, обеспечивающие, чтобы неточность теоретического учета дифракционной ошибки была в допустимых пределах. Это дало возможность пользоваться в дальнейшем только одним эталонным диском в свободном пространстве. Размеры диска в первых измерениях на волне 3,2 см с антенной диаметром 1,5 м были 60 и 120 см, а затем 4—5 м. Первый эталон с диском диаметром 60 см и отверстием в плоском экране был установлен в Ялте на крыше гостиницы "Ореанда". Там же были проведены первые точные измерения интегральной радиотемпературы на волне 3,2 см с радиотелескопом диаметром 1,5 м. Радиотелескоп с "искусственной Луной" диаметром 5 м устанавливался на горе возле развалин Генуэзской крепости в Судаке. На рис. 4.1 показана установка в Крыму на Карадаге, в которой использовалась 5-метровая "искусственная Луна" и радиотелескоп диаметром 12 м.

В результате применения нового метода оказалось возможным определять температуру Луны с погрешностью 1—2% в широком диапазоне волн. Ограничение метода состоит в трудности его применения для измерений при достаточно больших r , т.е. в случае больших антенн или миллиметровых волн при умеренных антеннах. Применение этого метода при значительных r требует больших дисков, устанавливаемых на больших высотах над землей, что практически неосуществимо. В дальнейшем, однако, метод был распространен и обоснован для установки дисков в ближней френелевской зоне дифракции антенны, что сильно расширяет возможности и в значительной степени снижает указанные выше ограничения [9].

Уже в 1961—1962 гг. измерения на волнах 0,4; 1,6; 3,2; 10 и 35 см, проведенные в НИРФИ с использованием метода искусственной Луны, показали систематический рост интегральной радиотемпературы от 205 до 237 К с увеличением длины волны (рис. 4.2). Этот

рост соответствовал изменению температуры от глубины 0,5 до 5—6 м, что являлось однозначным свидетельством существования потока тепла из недр Луны. Приповерхностный градиент температуры оказался равным $\sim 2\text{—}3$ К/м, чему соответствует поток тепла из недр примерно 10^{-6} кал/(см²·с) [9].

В период с 1961 по 1967 г. вслед за первыми успешными измерениями радиотемпературы с высокой точностью, позволившими обнаружить поток тепла из недр, а также ряд новых параметров вещества Луны (ϵ , ρ), последовала целая серия измерений радиоизлучения Луны по методу искусственной Луны в широком интервале спектра волн — от 0,087 до 60 см, проводившихся в основном на Карадагской станции и в ряде специальных экспедиций (Памир, Арагац, Уссурийск и др.). Наиболее полно эти результаты вместе с имеющимися мировыми экспериментальными данными приведены в ряде обзоров [26—28].

4.3. РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СВОЙСТВ ВЕЩЕСТВА ЛУНЫ

Электрические свойства, плотность и химический состав вещества Луны. Вместе с разработкой методов точных измерений шел интенсивный поиск методов определения свойств вещества верхнего покрова по различным характеристикам радиоизлучения.

Было обращено внимание на то, что измерение диэлектрической проницаемости верхнего слоя пород Луны в радиодиапазоне дает возможность определения плотности вещества верхнего покрова. Последнее основывается на том соображении, что для пористой среды диэлектрическая постоянная ϵ является функцией $\epsilon(P\epsilon_0)$ и главным образом степени пористости материала $P=1-\rho/\rho_k$, где ρ — объемная масса рассматриваемого пористого вещества, а ρ_k — объемная масса непористого кристаллического состояния. Значение диэлектрической постоянной ϵ_0 для плотной фазы влияет на ϵ существенно слабее. Поскольку мы определили, что лунные породы аналогичны земным вулканическим породам, то ϵ_0 может быть взято из данных для земных пород на сантиметровых волнах. Эта величина довольно слабо меняется в зависимости от состава породы и поэтому может считаться известной с достаточной точностью. Измеряя ϵ и зная ϵ_0 и ρ_0 , можно найти ρ и, следовательно, дать характеристику состояния вещества поверхности (сыпучая, твердопористая).

Была поставлена экспериментальная работа по изучению зависимости ϵ и $\tan\Delta$ от объемной массы (пористости) и типа породы в диапазоне от сантиметровых до метровых волн. Были исследованы многие десятки различных вулканических и осадочных пород, встречающихся на Земле. В первой же работе [22] было экспериментально показано, что диэлектрическая постоянная в диапазоне сантиметровых волн хорошо определяется формулой

$$\sqrt{\epsilon-1}=a\rho,$$

где в среднем для всех пород с погрешностью до $\pm 10\%$ величина

$a=0,5$. Величина $b=\rho^{-1}\text{tg}\Delta$ оказалась, как это и ожидали, довольно сильно зависящей от химического состава породы.

Эмпирическая формула для ϵ в силу простоты и достаточной точности, а также частоты применения в исследованиях планет и Земли теперь уже вошла в научную литературу как формула Кротикова — по фамилии ее автора. Дальнейшие исследования показали, что для кислых пород формула справедлива во всем наблюдаемом для них интервале плотностей, а для основных — до $\rho \leq 2 \text{ г/см}^3$ [29].

Наиболее обширные исследования проводились по изучению зависимостей $b=\rho^{-1}\text{tg}\Delta$ и $a=\rho^{-1}(\sqrt{\epsilon}-1)$ от химического состава пород. Неожиданно оказалось, что эти величины зависят в основном только от содержания SiO_2 в породе. Если обозначить содержание SiO_2 в процентах через x , то оказывается, что $b=960 x^{-2,85}$ для интрузивных пород и $1,8 \cdot 10^4 x^{-3,5}$ для эффузивных, а величина a равна $40/x$ для обоих типов пород [30].

Найденные зависимости параметров b и a от содержания SiO_2 пород получили название вариационных диаграмм диэлектрико-химических свойств [31]. Название взято по аналогии с установленными в минералогии вариационными диаграммами химического состава пород, демонстрирующими зависимость процентного содержания различных окислов в породах от содержания главного окисла — SiO_2 . Полученные зависимости говорят о том, что данный процент SiO_2 в породе задает вполне определенный состав других окислов и нет в природе пород, в которых SiO_2 и другие окислы находятся в случайном, произвольном соотношении концентраций.

Это позволяет использовать вариационные диаграммы для определения по известной для Луны величине b химического состава ее пород. При этом, как очевидно, поскольку b является средним по диску, можно получить некоторый средний преимущественный химический состав пород. В результате такого определения получено хорошее согласие найденного состава с имевшимися в то время данными о химическом составе, полученном автоматической станцией "Сорвейер" [32]. Теоретико-минералогический аспект вариационных диаграмм физических свойств был рассмотрен позднее в работе [33].

Независимые сведения об ϵ можно получить, наблюдая ряд эффектов радиоизлучения. Была показана [5] возможность определения ϵ по характеру распределения радиояркости по диску Луны. Из той же работы вытекала и возможность измерения ϵ по поляризации радиоизлучения различных участков Луны, которая детально разрабатывалась позднее [34].

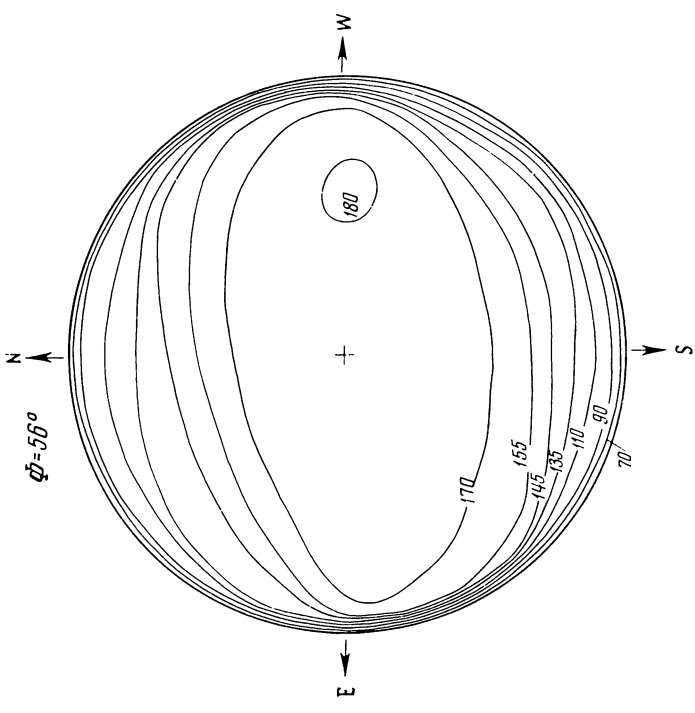
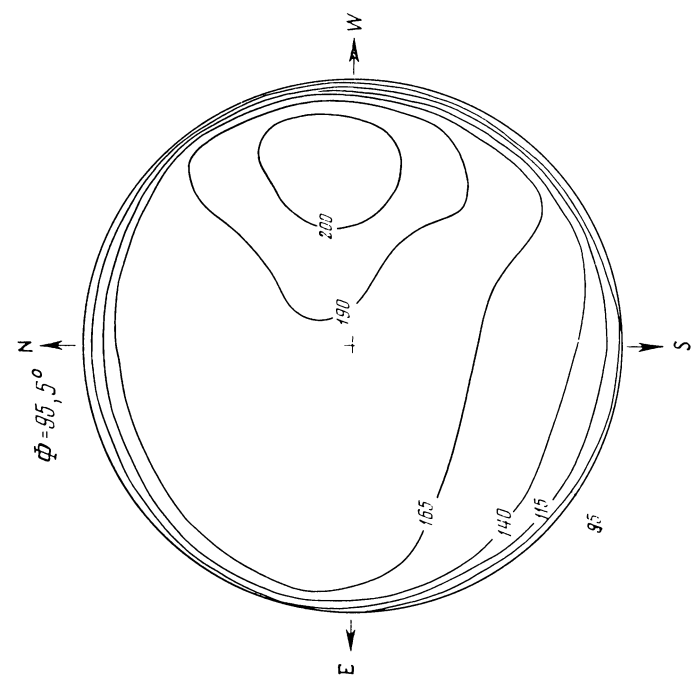
Возможности поляризационных измерений были реализованы в ГАО АН СССР на волне 3,2 см на Большом Пулковском радиотелескопе. Благодаря высокой разрешающей силе антенны были проведены первые измерения распределения поляризации по диску Луны, позволившие определить наиболее точное значение диэлектрической проницаемости вещества лунной поверхности и оценить степень крупномасштабной шероховатости ее поверхности [35].

Определение ϵ по характеру распределения радиояркости по диску Луны было получено на 22-метровом радиотелескопе ФИАН с высокой разрешающей силой. Впервые были выполнены измерения распределения радиояркости на волне 8 мм и определен интервал возможного значения диэлектрической постоянной [36] (рис. 4.3).

Наиболее доступно определение ϵ по разнице измеренной средней яркости на радио- и ИК-волнах, причем на ИК-волнах поверхность Луны может считаться абсолютно черной. Разница между этими температурами зависит от величины средней излучательной способности $(1 - \bar{R})$, где R — коэффициент отражения Френеля для радиоволн, который зависит от ϵ . Однако точных измерений постоянной составляющей яркостной температуры на ИК-волнах нам сделать не удалось, как, впрочем, не удалось это и зарубежным исследователям. Поэтому эта температура рассчитывалась по известному значению параметра γ , которое было получено ранее. Используя точные измерения средней по диску постоянной составляющей радиотемпературы, полученные по методу искусственной Луны на $\lambda = 3,2$ см, равной 210 К, и сравнивая их с расчетными значениями интегральной радиояркости для разных ϵ при заданном γ , было получено, что $1,2 \leq \epsilon \leq 1,7$ и, следовательно, по формуле Кротикова $0,2 \leq \rho \leq 0,8$ г/см³. Заметим, что здесь весь эффект изменения радиотемпературы за счет нечерноты Луны в радиодиапазоне составил всего 8 К, что тем не менее было достаточно надежно измерено по методу искусственной Луны.

Эти измерения ϵ , а также упомянутые выше определения ϵ по распределению радиояркости и особенно по поляризации позволили получить наиболее точное значение диэлектрической постоянной лунной породы. Кроме того, был предложен и применен метод непосредственного определения плотности пород Луны по известному значению теплового параметра $\gamma = (k\rho C)^{-1/2}$ [24]. Идея заключалась в том, что теплопроводность пористых и дисперсных тел в вакууме должна зависеть главным образом от их объемной массы, а не от природы вещества, т.е. его теплопроводности при плотном состоянии (теплопередача определяется в этих материалах в основном состоянием контактов зерен или тонкими перегородками пор). Существенно здесь и значение теплопередачи через тепловое электромагнитное излучение в порах — это создает температурно-зависимую часть теплопроводности.

По данным измерений теплопроводности пористых керамических тел и земных пород в воздухе было показано, что теплопроводность является линейной функцией только ρ и не зависит от природы материала, т.е. $k = \alpha\rho$ в интервале плотностей пород $0,4 \leq \rho \leq 1,5$ г/см³. Можно полагать, что такая же линейная зависимость имеется и для пористых материалов в вакууме или по крайней мере $k = k(\rho)$. В обоих случаях величина γ будет только функцией ρ и C . Величина α для пористых пород в вакууме в то время была определена, к сожалению, довольно приближенно. Поскольку минералогический состав лунной поверхности не отличается от земного, а γ для пород Луны определяется из наблюдений, то указанная универсальная функция



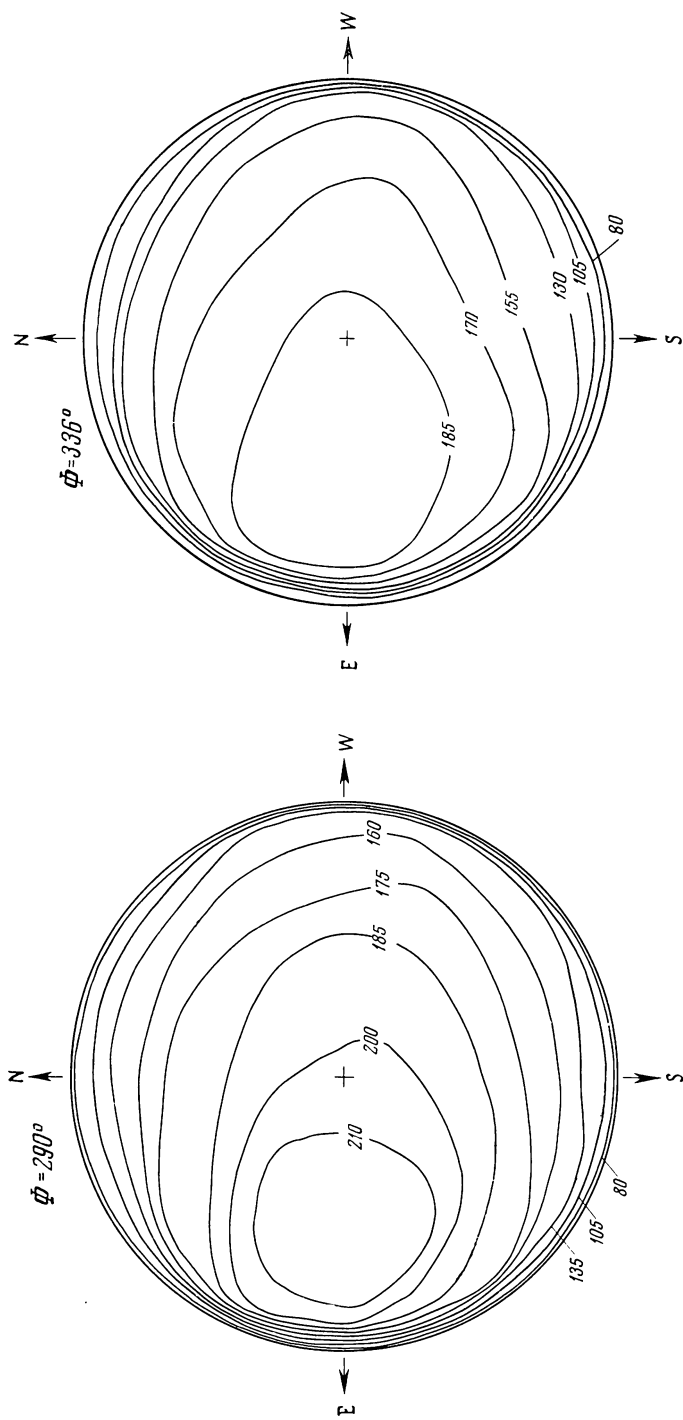


Рис. 4.3. Радионизображения Луны в различных ее фазах Φ , полученные на волне 8 мм впервые в 1959 г. на радиотелескопе РТ-22 ФИАН [36]

Цифры у изолиний — значения антенной температуры (в К)

может служить для определения плотности ρ пород на Луне. В результате было получено, что плотность породы в случае твердопористой структуры должна быть $\rho \approx 0,4 \pm 0,1 \text{ г/см}^3$.

Неоднородность свойств в глубину; толщина пористого слоя. Изучение неоднородности в верхней части слоя, у самой поверхности, возможно по наблюдению радиоизлучения Луны во время затмений. Из-за краткости процесса охлаждения поверхности все температурные изменения во время затмения происходят в слое толщиной порядка 1 см. Следовательно, переменный тепловой режим этого слоя несет сведения о его характеристиках, а лежащие ниже слои влияния не оказывают.

Вследствие малой глубины проникания тепловой волны во время затмения (затменной волны) исследования радиоизлучения должны были проводиться на миллиметровых волнах. Такие измерения в наиболее широком диапазоне на волнах 0,12; 0,21; 0,4; 0,6; 0,75; 1,6; 2,2 см были выполнены в НИРФИ в экспедициях, в том числе высокогорных, во время затмений Луны 6.07.63; 30.12.63; 25.06.64; 19.07.64; 19.12.64 г. [37]. Для интерпретации была разработана аналитическая теория радиоизлучения затменной Луны [38]. При этом сначала решалось уравнение теплопроводности для заданного изменения температуры поверхности Луны во время затмения. Эти изменения хорошо аппроксимировались кусочно-линейными функциями, соответствующими периоду наступающей полутени, полной тени и отступающей полутени. Далее по найденному значению температуры $T(x, t)$ в слое решением уравнения переноса находилась функция $T_\lambda(t, \lambda)$ изменения радиотемпературы данного участка поверхности Луны. Было найдено, что максимальные изменения радиотемпературы имеют место в конце теневой фазы. Обратная величина такого изменения оказывается пропорциональной величине отношения глубины проникания электромагнитной волны к затменной тепловой, что позволяет по затмению определить такую же комбинацию параметров, которая определяет фазовый ход радиоизлучения. Эти параметры относятся к слою толщиной порядка 1 см.

Сопоставление экспериментальных данных с теорией показало, что с погрешностью $\pm 30\%$

$$\gamma/b\sqrt{\varepsilon} = 6,5 \cdot 10^4. \quad (4.6)$$

Величина γ для самого верхнего слоя довольно надежно определена по затменным ИК-измерениям и равна 1000; при $\varepsilon = 1,5$ получаем $b \approx 1,2 \cdot 10^{-2}$. Заметим, что по измерениям фазового хода $\gamma/b\sqrt{\varepsilon} = 6,2 \cdot 10^4$ и $b \approx 1,0 \cdot 10^{-2}$.

Таким образом, электрические свойства вещества одинаковы на самой поверхности и в глубине, по крайней мере до полуметра, что говорит об идентичности их минералогического состава в указанном слое.

Однако ряд данных указывает на увеличение плотности в глубину. Этой причиной, в частности, объяснялось расхождение в величине γ , определенной по лунациям и затмению. Соответствующие величины составляют 600—700 и 1000—1100. Оказалось, что этот

эффект объясняется главным образом довольно сильной зависимостью теплопроводности лунного вещества от температуры за счет радиационного переноса тепла в порах вещества и небольшим увеличением плотности в слое 1—2 см.

Вместе с неоднородностью поверхностного слоя, несомненно, должна существовать неоднородность плотности и структуры в глубину. Очевидно она должна проявиться наличием градиента температуры в глубину, так как имеется достаточный поток тепла из недр, и спектра коэффициента отражения электромагнитных волн, определяемого по радиолокационным измерениям. Довольно убедительным указанием на изменение плотности в глубину являлись полученные за рубежом в начале 60-х годов результаты локационных исследований Луны. Как известно, при локационных измерениях определяется в конечном счете коэффициент отражения электромагнитных волн от поверхности Луны, и, следовательно, могут быть найдены диэлектрическая постоянная и плотность. Очевидно, что измеряя отражение на различных волнах, можно получить представление о характере изменения плотности вещества в глубину.

Анализ радиолокационных измерений коэффициента отражения показал, что наблюдается довольно резкое увеличение коэффициента отражения на волнах около 35 см и 8—10 м. Это было интерпретировано как довольно резкое увеличение плотности вещества, имеющее место на некоторых глубинах h_1 и h_2 под поверхностью. Действительно, для волны $\lambda \ll h_1$ отражение будет определяться диэлектрической постоянной слоя на его границе с вакуумом, а для волны $\lambda \gg h_1$ этот менее плотный слой является тонким и не будет оказывать влияния. Коэффициент отражения этой волны будет определяться лежащей ниже плотной средой.

То же самое рассуждение относится и к следующему скачку спектра отражения, только ему соответствует существенно бо́льшая глубина скачка плотности. Исторически вначале были проведены анализ и интерпретация первого скачка в спектре коэффициента отражения Луны в диапазоне волн от сантиметровых до метровых [39]. При этом для неоднородного распределения плотности вещества в глубину был рассчитан спектр коэффициента отражения, описываемый уравнением Рикатти. Принимался экспоненциальный закон изменения плотности в виде

$$\rho(h) = \rho_2 - (\rho_2 - \rho_1)e^{-h/h_1}, \quad (4.7)$$

где h_1 — характерная толщина верхнего неплотного слоя; ρ_1 — плотность на поверхности; ρ_2 — плотность в глубине при $h \gg h_1$. Экспериментальный спектр хорошо согласуется с расчетом для модели $\rho_1 = 0,6$ г/см³, $\rho_2 = 1,0$ г/см³, $h_1 \approx 4$ см. Таким образом, плотность, а следовательно, и теплопроводность вещества меняются на глубине нескольких сантиметров примерно в 1,5 раза.

Полный аналогичный расчет спектра с двумя скачками плотности, выполненный позднее, показал, что наилучшее согласие имеет место с моделью, когда слой с $\rho_2 = 1,0$ г/см³ простирается до глубины порядка 200—300 см, где плотность возрастает до плотности

скальных пород, равной $\rho_0 \approx 2,5 \text{ г/см}^3$ [40]. Поскольку при локационных исследованиях вклад в обратное рассеяние дает центральная часть диска Луны, то полученная картина распределения относится к этому району поверхности Луны.

Поток тепла из недр Луны и толщина пористого слоя; тепловая история Луны. По мере накопления точных измерений радиотемпературы Луны на целом ряде волн был получен детальный спектр постоянной составляющей радиотемпературы в диапазоне волн 0,4—60 см. Оказалось, что рост температуры имеет место до волны 30—35 см. Далее с удлинением волны температура не меняется. Прекращение роста радиотемпературы с волной однозначно свидетельствует об увеличении плотности вещества в глубину начиная с 4—6 м, что приводит к сильному увеличению его теплопроводности и, следовательно, к уменьшению градиента температуры. Заметим, что начальные оценки потока тепла делались по части спектра (волны 3—15 см) постоянной составляющей, соответствующей изученному по лунам верхнему метровому слою вещества. Несомненно, что существование плотной подложки пористого слоя оказывало влияние на эту часть спектра. Отсюда возникла задача разработки теории радиоизлучения плоскостной среды с заданным законом изменения плотности в глубину при наличии потока тепла из недр Луны. Оказалось, что наблюдаемому спектру достаточно хорошо соответствует двухслойная модель, когда плотные скальные породы покрыты пористым слоем толщиной 3—5 м с неизменной плотностью (1 г/см^3) и теплопроводностью либо более толстым слоем с линейным изменением плотности. Для обеих моделей тепловой поток оказался в пределах $q_s = 0,7 \div 0,9 \text{ кал/(см}^2 \cdot \text{с)}$ [41].

Таким образом, толщина пористого слоя, найденная из радиоастрономических измерений спектра радиотемпературы Луны, хорошо согласуется с оценкой толщины слоя по локационным измерениям.

Полученное значение плотности потока тепла из недр Луны почти в 4 раза превышает теоретические оценки потока тепла в предположении об образовании Луны из вещества, аналогичного веществу каменных метеоритов-хондритов. Полученный экспериментальный результат приводит к далеко идущим заключениям о происхождении и тепловой истории Луны. В самом деле, по современным данным, основным источником внутреннего тепла планет является тепло, выделяемое при радиоактивном распаде содержащихся в породах урана, тория и изотопа калия. Если предположить, что, как и у Земли, поток тепла из недр Луны связан с распадом этих элементов и что к настоящему времени тепловой процесс достиг стационарности, то все выделяемое Луной тепло равно теплу радиоактивного распада. Общее тепловыделение составляет $Q = 10^{19} \text{ кал/год}$, т.е. на 1 г вещества Луны приходится тепловыделение $q_m = 1,35 \cdot 10^{-7} \text{ кал/(г} \cdot \text{год)}$. Эта плотность тепловыделения примерно в 4 раза больше, чем соответствующая величина для Земли, равная $0,35 \cdot 10^{-7} \text{ кал/(г} \cdot \text{год)}$, и в несколько раз больше, чем у каменных метеоритов-хондритов, у которых тепловыделение, по разным литературным

источникам, составляет от $0,4 \cdot 10^{-7}$ до $1 \cdot 10^{-7}$ кал/(г·год). Таким образом, средняя концентрация радиоактивных элементов в лунном веществе в 4 раза больше, чем у Земли.

Новые данные существенно меняют представления о тепловой истории Луны. Соответствующие расчеты [42] показали, что только при этой высокой концентрации радиоактивных элементов достигается почти полное расплавление вещества Луны и, следовательно, обеспечивается наиболее полная дифференциация недр и вынос радиоактивных элементов на поверхность. Процесс выноса радиоактивных элементов к поверхности обусловлен тем, что последние химически связываются с легкими силикатными породами. Вынос радиоактивных элементов к поверхности приводит к прекращению в дальнейшем нагрева недр, так как все тепловыделение происходит теперь у поверхности и тепло рассеивается в пространство. В результате процесса дифференциации недр наступает равновесное тепловое состояние или медленное охлаждение планеты.

Большая концентрация радиоактивных элементов приводит к более раннему прекращению разогрева и, следовательно, к затвердеванию расплава в настоящее время на большие глубины. Как показывают расчеты, при высокой концентрации радиоактивных элементов толщина твердой коры Луны может достигать в настоящее время 600—700 км, а при малой концентрации, соответствующей содержанию радиоактивных элементов в Земле, 300—400 км. При этой концентрации процесс плавления затягивается и недра не успевают остывать. По современным данным, Луна не имеет равновесной фигуры, что говорит о толстой, твердой коре. Достаточно глубокое отверждение, как это ни парадоксально, может произойти только при достаточно высокой концентрации радиоактивных элементов.

Зная общее содержание радиоактивных элементов в теле Луны и на самой поверхности, а также делая предположение о характере закона убывания концентрации с глубиной, можно определить эффективную толщину слоя радиоактивной породы. Соответствующие расчеты показали [43], что если лунная кора состоит из пород типа земных гранитов со свойственной им высокой концентрацией радиоактивных элементов и их концентрация убывает с глубиной по экспоненте, то для объяснения наблюдаемого потока тепла эффективная толщина слоя, в котором концентрация убывает в 2,7 раза, должна быть около 10 км, для базальтовой коры необходима толщина 40 км. Породы, доставленные с Луны "Аполлоном-11", показали, что их радиоактивность (тепловыделение на грамм за год) близка к радиоактивности земных базальтов и равна $(1,0—1,2) \cdot 10^{-6}$ кал/(г·год). Это дает эффективную толщину слоя с радиоактивными элементами около 60 км. Чтобы радиоактивные элементы были вынесены в такой тонкий слой, расплавление должно быть практически полным.

Таким образом, Луна в целом представляет подобие термостата, нагревательные элементы которого расположены на периферии в слое толщиной ~ 50 км. Отсюда нетрудно оценить температуру недр, ко-

торая будет расти примерно до этой глубины. При обычной теплопроводности твердых непористых пород и найденном потоке тепла градиент температуры составляет около 15 К/км, т.е. уже на глубине 50 км температура достигает 600—700 К.

Радиационная теплопроводность и микроструктура пористого слоя. Теплопроводность пористых тел заведомо должна зависеть от температуры за счет радиационного переноса тепла через поры. В "лунном" интервале температур лучистый перенос осуществляется на ИК-волнах, длина которых соответствует планковскому максимуму и равна $\lambda = 10 \div 30$ мкм. Радиационная теплопроводность определяется размером пор и длиной пробега кванта в веществе. Неоднократно делались различные попытки как у нас, так и за рубежом обнаружить влияние радиационного переноса на характер суточного хода ИК-и радиотемпературы Луны. Однако оказалось, что получаемые эффекты лежат много ниже возможностей измерений.

Для оценки доли радиационного переноса необходимо было найти явления, в достаточно сильной степени определяемые температурной зависимостью теплопроводности. Такое явление, как оказалось, существует. Было доказано, что наличие слабой температурной зависимости теплопроводности приводит к качественно новому эффекту, состоящему в увеличении постоянной составляющей температуры в глубину в слое порядка $(2-4)l_T$ за счет детектирования температурной волны, распространяющейся в нелинейной среде, т.е. среде, свойства которой зависят от величины самой температурной волны [9]. Вследствие этого эффекта постоянная составляющая должна расти в глубину в пределах досягаемости суточной температурной волны, т.е. на $(3-4)l_T$, и далее оставаться неизменной. Следовательно, при измерениях на волнах 1,5—2 см, что позволяет получать температуру на глубинах $(3-4)l_T$ соответственно, постоянная составляющая должна быть выше, чем на поверхности, на всю величину прироста температуры из-за температурной зависимости тепловых свойств. Таким образом, измерив постоянную составляющую температуры на поверхности (на ИК-волнах) и в глубине (на волнах 1,5—3 см), можно найти прирост постоянной составляющей температуры и определить долю радиационной теплопроводности. Такое определение стало возможным благодаря точным измерениям радиотемпературы по методу искусственной Луны. Было обращено внимание на то, что постоянная составляющая ИК-температуры на 10—15 К ниже, чем радиотемпература на волне 3,2 см. Сопоставлением с теорией было найдено, что радиационная часть теплопроводности при температуре 300 К составляет 25% от решеточной для непрозрачного на ИК-волнах лунного вещества и 50% для полупрозрачного. Отсюда получается, что размеры пор и сцепленных частицыхлопористого покрова должны быть заключены в пределах 50—300 мкм [44, 44а].

В связи с существенным влиянием радиационного переноса тепла в пористом веществе Луны возник вопрос о том, насколько используемое обычно уравнение теплопроводности, в котором лучи-

стый перенос не учитывается, является применимым для описания теплопередачи в лунном слое. В результате теоретического рассмотрения этого вопроса получено модифицированное уравнение теплопроводности, позволяющее учесть влияние лучистого переноса [45]. Степень этого влияния для условий Луны оказалась несущественной.

Был теоретически рассмотрен вопрос о совместном влиянии температурной зависимости как тепловых параметров, так и угла потерь вещества. Оказалось, что последнее имеет значение для коротких миллиметровых волн, на которых постоянная составляющая из-за этого эффекта возрастает на $10\text{--}20^\circ$ для волн $0,1\text{--}0,2$ см [46]. Этот эффект экспериментально не изучался из-за трудностей точных измерений по методу искусственной Луны на этих волнах.

Полученные данные позволили сделать некоторые выводы, касающиеся строения и истории развития Луны в целом. Чрезвычайно мелкозернистая структура пористого вещества с зернами до десятков микрометров говорит о существовании стадии сильного дробления и переработки верхнего покрова. Средняя по полусфере глубина этого слоя, равная 4 м, указывает на весьма большую эффективность этих факторов. По-видимому, здесь имела место переработка вещества интенсивными ударами метеоров.

Совокупность данных о физическом состоянии и структуре верхнего покрова Луны позволила оценить прочность лунного материала [47]. Эти данные, приведенные в табл. 4.1, использовались при проектировании первого Лунохода и подтверждены, как многие другие, последующими прямыми измерениями.

Однородность свойств по поверхности; сравнение с прямыми измерениями. Полученные выше данные характеризуют средние по всей полусфере Луны параметры. Поэтому естественно возникает вопрос о том, в какой мере они соответствуют локальным значениям, полученным прямыми измерениями в данной точке поверхности или с высоким разрешением, при котором имеет место усреднение по площади в десятки и сотни километров. Согласно исследованиям на ИК-волнах, тепловые свойства по диску Луны, за исключением дна лучистых кратеров, меняются очень мало, не более чем на $20\text{--}25\%$ при усреднении в несколько десятков километров. Эти измерения находятся практически в пределах точности измерения. Обнаружена также достаточно большая степень однородности по диску характеристик радиоизлучения при усреднении по площадям от десятков до сотен километров. Эти данные получены по измерениям на радиотелескопе РТ-22 ФИАН при построении "радиоизображений" Луны на волнах миллиметрового диапазона [48]. В связи с этим можно говорить о существовании в масштабе сотни километров радиометрической однородности, аналогичной известной фотометрической однородности, представляющей стандартность характеристик отраженного света. В оптическом диапазоне это указывает на однородность микроструктуры поверхности, в ИК-диапазоне — на однородность тепловых параметров, а в радиодиапазоне радиометрическая однородность указывает на то, что электрические свой-

Таблица 4.1. Структура и свойства вещества верхнего покрова Луны, полученные по дистанционным (радиоастрономическим) и прямым измерениям

Характеристика	Измерения дистанционные	Измерения прямые
	Средние по полусфере параметры (1953—1967 гг.)	Локальные параметры (1967—1975 гг.)
1	2	3
Структура верхнего покрова	Рыхлая, пористая	Рыхлая, пористая
Толщина пористого слоя, м	4	4—10
Размеры пор и частиц, мкм	50—300	160
Плотность вещества по слоям, г/см ³		
приповерхностный:		
$0 \leq x \leq 2$ см	0,6—0,8	—
$0 \leq x \leq 5$ см	—	1—1,5
средний: $5 \leq x \leq 40$ см	1,0—1,5	1,5—2
основной: $50 \leq x \leq 400$ см	2	2
скальные породы	2,5—3,0	2,4—2,8
Несущая способность грунта (прочность), кг/см ²		
приповерхностный слой (1—2 см)	0,3	0,2—0,6
основной пористый слой	2,0	3,0
Внутреннее сцепление грунта, кг/см ²	$8 \cdot 10^{-3}$	$(1—15) \cdot 10^{-3}$
Содержание SiO ₂ , %	50—60	45—50
Преобладающий тип породы	Средние и основные	Основные
Химический состав по весу, %		
SiO ₂	57,0	47±3
Al ₂ O ₃	16,5	16,5±3
FeO	7,5	12±1,8
MgO	3,5	7,0±2
CaO	6,0	14±2
Na ₂ O	4,0	1,7±1,3
K ₂ O	3,0	0,5
TiO ₂	2 — 0,7	2
Градиент температуры основно- го пористого слоя, К/м	3 — 4	1,6±0,4
Поток тепла из недр, кал/(см ² ·с)	$(0,7—0,9) \cdot 10^{-6}$	$(0,4—0,8) \cdot 10^{-6}$
Удельный угол потерь на СВЧ среднего слоя, tgΔ	$(8±2) \cdot 10^{-3}$	$(5±1,6) \cdot 10^{-3}$
Глубина проникания электро- магнитных волн в основном по- ристом слое	$(14±2)\lambda$	$(8 — 10)\lambda$
Диэлектрическая постоянная вещества на СВЧ		
приповерхностный слой (1—2 см)	1,5 — 2	2,4 — 2,8
основной пористый слой (4 м)	2,4 — 2,8	5 — 6
скальные породы	5,0 — 6,0	
$\varepsilon = \varepsilon(\rho)$	$\sqrt{\varepsilon} - 1 = 0,5\rho$	$\sqrt{\varepsilon} - 1 = 0,55\rho$
Теплопроводность основного по- ристого слоя, кал/(см·с·К)	$(8—12) \cdot 10^{-6}$	$(21—31) \cdot 10^{-6}$

Таблица 4.1 (окончание)

1	2	3
Коэффициент температуро- проводности, $\text{см}^2 \cdot \text{К}$	$4 \cdot 10^{-5}$	$(7-9) \cdot 10^{-5}$
Глубина проникания тепловой волны, см	7 — 8	8 — 9
Параметр γ		
приповерхностный слой	1000	800—1200
основной пористый слой	600—800	400—800
Полный поток тепла из недр Луны, ккал/год	$\sim 10^{19}$	$(0,5-1) \cdot 10^{19}$
Температура на глубине ~ 50 км, К	1000	
Эффективная толщина базальто- вого покрова	40	20

ства вещества по поверхности Луны в приведенном выше масштабе усреднения одинаковы. В частности, оказывается, что вещество на поверхности морей и материков практически одинаково. Заведомо не соответствует характеристикам излучения гипотеза, что верхняя порода материков — граниты, а морей — базальты [49].

Большой интерес несомненно представляет сравнение различных параметров верхнего покрова Луны полученных дистанционными методами и путем прямых измерений, выполненных космонавтами и автоматами непосредственно на Луне или в лабораториях на привезенных образцах (см. табл. 4.1) [50].

Необходимо при этом заметить, что при измерениях непосредственно на поверхности Луны могут быть, конечно, обнаружены сильные различия в свойствах, связанные, например, с присутствием неразрушенных обломков скальных пород и т.п. Это затрудняет соответствующее сопоставление.

Радиоастрономические данные преимущественно являются усредненными практически для всего диска Луны, в то время как измерения непосредственно в одном или даже в нескольких местах не могут надежно представлять средние величины. Многие прямые измерения, особенно тепловых и электрических свойств, проводились на образцах пород, отобранных космонавтами. Неизвестно, насколько эта выборка образцов представительна для большей части поверхности Луны. В связи с этим в табл. 4.1 появляются широкие интервалы для ряда параметров, которые измерялись непосредственно на Луне или на доставленных с Луны образцах. Это относится к теплопроводности, коэффициенту температуропроводности, углу потерь и др. Очевидно, что образец в виде камня даст совершенно иные тепловые параметры, чем раздробленная пористая основа верхнего покрова, доставить которую в неизменном виде весьма трудно. Между тем ряд измерений коэффициента температуропроводности делался именно для этих плотных слабoporистых пород. Вызывает удивление слишком низкий тангенс угла потерь многих лунных об-

разцов, который обычно имеет место лишь для очень кислых пород, тогда как по тем же прямым измерениям вещество Луны большей частью является основным (базальт).

Наконец, обращает на себя внимание резкое противоречие данных прямых измерений ϵ и ρ пористого слоя с установленной для лунного вещества зависимостью $\sqrt{\epsilon}=1+0,55\rho$. Имеются и другие, более мелкие невязки в данных прямых измерений. Следует вместе с тем подчеркнуть, что некоторые невязки имеются и в дистанционных данных, хотя в большинстве случаев в пределах обычных ошибок измерений. Заметим при этом, что радиоастрономические данные получены при использовании совокупности соответствующих частных моделей, наилучшим образом определяющих тот или иной параметр. Расчет общей суммарной модели и согласование в ней всех параметров проведен не был, и эта задача ждет своего решения, что, однако, может изменить данные лишь в пределах отмеченных интервалов неопределенности. Для прямых измерений, проведенных в США, анализ согласованности данных, как видно, проведен не был, в результате чего наблюдаются отмеченные выше внутренние противоречия этих измерений.

Таким образом, подводя итоги дистанционному исследованию Луны, можно сказать, что полученные данные являются не менее репрезентативными, чем данные прямых измерений, а в части описания средних по поверхности характеристик являются более представительными, чем прямые, хотя средств на наземные радиоастрономические исследования Луны было затрачено на много порядков меньше, чем на прямые.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Если до возникновения радиоастрономии велись астрофизические исследования практически только светящихся тел, имеющих достаточно высокую температуру светового излучения, то радиоастрономия сделала несветящиеся холодные объекты доступными для изучения. Вначале представлялось, что фиксация собственного теплового радиоизлучения мало что может дать для определения природы этих объектов. Однако это оказалось совсем не так. Разработанные методы изучения таких объектов, продемонстрированные выше на примерах исследования Луны, убедительно показали большие эвристические возможности методов радиоастрономии. Подводя итоги этих исследований, можно сказать, что в результате разработаны общие методы определения свойств и структуры вещества верхнего покрова безатмосферных планет и их спутников по измерениям спектров собственного излучения и отражения электромагнитных волн. К настоящему времени эти методы перенесены на дистанционные исследования планет наземными средствами и с космических аппаратов (см. гл. 5 и 6), а также для изучения самой Земли из космоса — ее атмосферы и подстилающей поверхности: суши и океанов (см. гл. 8). Все это находит применение в практической деятельности человечества. За последнее время эти методы перенесены на иссле-

дование внутренних органов тела человека по их тепловому радиоизлучению, что позволяет фиксировать очаг воспалительных, онкологических и других патологических процессов и осуществлять медицинскую диагностику (см. гл. 8). Таким образом, представлявшиеся поначалу далекими от повседневной жизни астрофизические исследования Луны и планет оказались весьма полезными.

Глава 5

РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛАНЕТ

5.1. ВЕНЕРА

Радиоастрономические исследования планет в СССР были начаты в 1959 г. в ФИАНе [1]. Первым объектом таких исследований была планета Венера. С научной точки зрения именно Венера представляла наибольший интерес для исследователей. Действительно, Венера — самое яркое светило на небе после Солнца и Луны и наиболее близкая к Земле планета Солнечной системы (в нижнем соединении расстояние до нее составляет около 40 млн км). Венера веками привлекала внимание астрономов. Только определению ее периода вращения астрономическими методами с 1666 г. посвящено более 100 статей. Однако до начала радиоастрономических исследований об этой планете было получено гораздо меньше сведений, чем, например, о Марсе, который даже в великие противостояния, т.е. 1 раз в 17 лет, приближается к Земле лишь примерно на 60 млн км. Не были определены такие фундаментальные характеристики планеты, как температура и агрегатное состояние вещества поверхности, диаметр планеты.

Основной причиной такой скудности сведений о Венере была плотная атмосфера, делающая поверхность планеты недоступной для астрономических наблюдений в видимом и ИК-излучениях. Недостаток фактических данных порождал многочисленные гипотезы о физических условиях на Венере. Наиболее популярной из них, основанной на близости Венеры и Земли по таким параметрам, как размеры, масса, средняя плотность и расстояние от Солнца, была гипотеза о Венере — "сестре Земли", имеющей примерно такие же температуру поверхности, атмосферу и, возможно, даже жизнь.

Важность исследования планеты Венера диктовалась также потребностями программы космических исследований планет Солнечной системы. Именно ближайшая к Земле планета — Венера являлась первой в ряду этих исследований.

С точки зрения радиоастрономического эксперимента исследования планет также следовало начинать с наиболее близкой к Земле Венеры.

Однако, как уже упоминалось, даже в ближайшем к Земле положении Венеры в нижнем соединении расстояние до планеты примерно в 100 раз больше, чем до Луны. Даже с учетом большего размера планеты плотность потока радиоизлучения Венеры на 3 порядка меньше, чем Луны. Поэтому радиоастрономические исследования Ве-

неры не могли проводиться на небольших радиотелескопах, применявшихся для исследования радиоизлучения Луны. Были необходимы более крупные радиотелескопы.

Как известно, плотность потока теплового радиоизлучения планеты с температурой T , видимой в телесном угле Ω ,

$$S = 2kT \Omega / \lambda^2$$

обратно пропорциональна квадрату длины волны λ . Поэтому измерения радиоизлучения лучше проводить в коротковолновой части радиоастрономического диапазона.

Радиоизлучение Венеры было обнаружено в 1956 г. в США К. Майером, Т. Мак-Каллофом и Р. Слонейкером [2] на наиболее короткой волне самого крупного в то время радиотелескопа диаметром 15 м. Сам факт радиоизлучения планеты не был неожиданным, так как тепловое излучение любого тела происходит и на радиоволнах. Однако если Венера по своим физическим характеристикам является "сестрой Земли" с температурой поверхности около 300 К, то ожидаемая яркостная температура радиоизлучения должна быть не выше 300 К. Измерения же дали значение яркостной температуры почти в 2 раза большее: $\overline{T}_я = 560 \pm 73$ К. Если измеренное радиоизлучение действительно тепловое и исходит от поверхности планеты, следовало кардинально изменить существовавшее в то время представление о Венере и отказаться от надежд обнаружить на планете жизнь.

Таким образом, обнаружение радиоизлучения Венеры потребовало для правильной интерпретации решения двух вопросов: 1) является ли излучение тепловым или нетепловым; 2) исходит ли оно от поверхности, атмосферы или ионосферы.

Одним из тестов выбора между тепловым и нетепловым механизмами излучения является частотный спектр. Попытки решить этот вопрос в США не привели к успеху. Яркостные температуры, измеренные на волнах 9,4 см [3] и 8,6 мм [4], из-за больших ошибок измерений удовлетворяли как тепловому, так и нетепловому механизму.

Первые радиоастрономические измерения Венеры в СССР были проведены в 1959 г. А.Д. Кузьминым и А.Е. Саломоновичем [1] на волне 8 мм на самом большом в то время радиотелескопе миллиметрового диапазона диаметром 22 м. Результаты измерений показали, что яркостная температура Венеры в миллиметровом диапазоне ($\overline{T}_я = 380 \pm 75$ К) в 1,5 раза ниже, чем на сантиметровых волнах. Кузьмин и Саломонович предложили также объяснение этой разницы, предположив, что более низкая яркостная температура на миллиметровых волнах обусловлена поглощением этих волн в относительно холодной атмосфере, окружающей горячую поверхность. Независимо от них такая же гипотеза была выдвинута в 1960 г. К. Саганом в США [5], предложившим также механизм нагрева поверхности за счет парникового эффекта.

Однако такая интерпретация не являлась однозначной. В 1961 г. Д. Джонсом [6] была предложена альтернативная так называемая

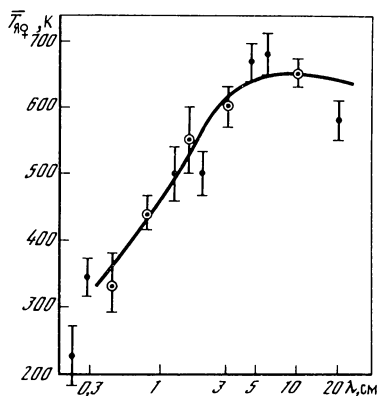


Рис. 5.1. Частотный спектр усредненной по видимому диску яркостной температуры Венеры $T_{я}(\lambda)$

Точки — данные измерений (в кружках — по [7—11]). Сплошная кривая — расчетный спектр радиоизлучения Венеры, атмосфера которой содержит 97% CO_2 и 0,1% H_2O . Распределения температуры и давления в атмосфере Венеры приняты по данным измерений АМС "Венера"

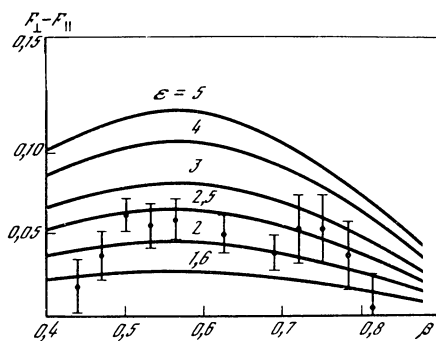


Рис. 5.2. Разность функций видимости радиоинтерферометра в поляризации, перпендикулярной $F_{\perp}$ и параллельной $F_{\parallel}$ базе интерферометра, в зависимости от разрешения интерферометра $\beta = Dr_{\phi}/\lambda$ (D — длина базы, r_{ϕ} — угловой радиус Венеры)

ионосферная модель. Он предполагал, что источником высокотемпературного излучения на сантиметровых волнах является очень плотная ($N_e = 10^9 \text{ см}^{-3}$) ионосфера, имеющая более высокую электронную температуру, чем поверхность. На миллиметровых же волнах ионосфера становится прозрачной, и наблюдаемое излучение обусловлено поверхностью, имеющей в этом случае более низкую температуру ($\sim 400 \text{ K}$).

В 1961—1963 гг. в СССР Ю.Н. Ветухновской, А.Г. Кисляковым, А.Д. Кузьминым, Б.Г. Кутузой, Б.Я. Лосовским и А.Е. Саломоновичем были проведены измерения яркостной температуры Венеры на волнах 4 [7], 8 мм [8, 9], 1,6, 3,3 [9,10] и 9,6 см [11] и построен частотный спектр ее радиоизлучения. Анализ спектра (рис. 5.1) показал, однако, что ему удовлетворяют обе упомянутые выше модели. Но физические условия на планете в этих моделях сильно различаются. Первая модель соответствовала очень высоким температурам и большим давлениям на поверхности. Вторая — условиям, близким к земным.

Важность выбора модели определялась еще и тем, что с 1960 г. в СССР начались запуски космических аппаратов к планете Венера. На очередь встало создание аппаратов для спуска на планету и проведение прямых измерений в атмосфере и на поверхности. Для конструкторов посадочных аппаратов было очень важно знать температуру поверхности и атмосферы Венеры. Были необходимы новые подходы к решению этой проблемы.

Первая попытка такого подхода к выбору модели и определению

температуры была основана на измерении распределения радиояркости по диску планеты. Идея эксперимента заключалась в том, что в модели "холодной" атмосферы следовало ожидать уменьшения яркостной температуры планеты от центра диска к краю, где больший вклад в излучение вносит атмосфера. В ионосферной модели атмосферы на краю диска больший вклад вносит "горячая" ионосфера, и следует ожидать уярчения края диска. Такие измерения, требующие очень высокой разрешающей способности, были проведены в 1962 г. Д.В. Корольковым, Ю.Н. Парийским, Г.М. Тимофеевой, С.Э. Хайкиным [12]. Для получения необходимого высокого разрешения был использован Большой Пулковский радиотелескоп (БПР) с ножевой диаграммой направленности шириной $1,2'$. Анализ полученных данных показал, что на волне 3 см характер распределения радиояркости лучше согласуется с потемнением края диска планеты и заведомо противоречит уярчению лимба.

Однако измерения распределения радиояркости, проведенные в том же 1962 г. в США, дали противоположный результат. Так, данные интерферометрических измерений Б. Кларка и К. Спенсера [13] на волне 10 см не согласуются с потемнением края диска и даже равномерным распределением радиояркости. В эксперименте Ф. Барата и др. [14] с установкой радиотелескопов на американский космический аппарат "Маринер-2" был получен противоречивый результат. Так, на волне 1,9 см было получено уменьшение яркостной температуры от центра к краю, в то время как на более короткой волне, 1,35 см, где этот эффект должен быть сильнее, потемнение к краю диска не наблюдалось.

Другой подход, позволивший дать определенный ответ на вопрос о том, откуда исходит наблюдаемое излучение и какова температура поверхности планеты, предложил А.Д. Кузьмин и совместно с Б. Кларком в 1964 г. реализовал в советско-американском эксперименте [15].

Идея эксперимента заключалась в том, что из-за различия коэффициентов отражения Френеля для вертикальной и горизонтальной поляризаций тепловое излучение поверхности планеты должно быть поляризовано около краев диска. Вместе с тем излучения атмосферы и ионосферы одинаковы для обеих поляризаций и поэтому неполяризованы.

Высокое угловое разрешение эксперимента, необходимое для выделения на диске планеты областей различной поляризации, было достигнуто благодаря использованию радиоинтерферометра Калифорнийского технологического института. Измеряемыми величинами являлись интерферометрические функции видимости в поляризации, перпендикулярной $F_{\perp}$ и параллельной $F_{\parallel}$ базе интерферометра. Ожидалось, что в случае излучения поверхности $F_{\perp}$ будет больше $F_{\parallel}$. Расчетная величина этого превышения зависит от диэлектрической проницаемости поверхности ϵ и показана на рис. 52 в зависимости от длины базы (в единицах длин волн). В случае излучения ионосферы или атмосферы ожидалось $F_{\perp} - F_{\parallel} = 0$. Результаты эксперимента, также приведенные на рис. 52, показывают явное превы-

шение $F_{\perp}$ над $F_{\parallel}$ и близкий к ожидаемому характер зависимости $F_{\perp} - F_{\parallel} = f(\beta)$. Это доказывает, что наблюдаемое на волне 10 см излучение является тепловым излучением поверхности Венеры. Из сравнения измеренных и расчетных значений $F_{\perp} - F_{\parallel}$ была определена $\epsilon = 2,5$ и температура поверхности 630 ± 70 К.

По положению нулей функции видимости А.Д. Кузьмин и Б. Кларк впервые определили также радиус поверхности Венеры ($a = 6057$ км) и оценили высоту верхней границы видимого облачного слоя ($h_{\text{обл}} = 63$ км). Обе указанные величины находятся в хорошем согласии с последующими, более точными измерениями с космических аппаратов ($a = 6050$ км).

Полученные данные использовались при разработке посадочных аппаратов серии "Венера", в конструкциях которых были предусмотрены теплозащита и парашют из термостойкой ткани. В свою очередь, прямые измерения температуры поверхности Венеры, проведенные через 8 лет посадочными аппаратами автоматических межпланетных станций (АМС) "Венера-7 и -8" [16], дали более точные значения температуры поверхности: 740 ± 20 К.

Таким образом, представление о Венере как о планете с очень горячей поверхностью нашло окончательное подтверждение, а полученные в космическом эксперименте данные дали возможность более точно интерпретировать результаты радиоастрономических измерений. Так, с учетом поглощения в атмосфере, рассчитанного на основе данных о химическом составе и давлении, полученных с помощью космических аппаратов, А.Д. Кузьмин и Т.В. Смирнова провели уточнение данных интерферометрических поляризационных измерений и получили значения диэлектрической проницаемости $\epsilon = 3,1 \pm 1$ [17] и температуры поверхности 760 ± 80 К [18].

Совершая движения относительно Солнца и Земли, Венера смекает для земного наблюдателя фазы, подобно фазам Луны. В нижнем соединении, когда Венера находится между Солнцем и Землей, к Земле обращена неосвещенная Солнцем ночная сторона. В верхнем соединении Венера находится за Солнцем и к Земле обращена ее освещенная, дневная сторона. Проводя радиоастрономические измерения в разных фазах на волнах $\lambda \approx 10$ см, на которых наблюдаемое излучение обусловлено в основном поверхностью, можно измерить суточный ход температуры поверхности. Эти важные для физики планеты измерения были осуществлены в 1962—1966 гг. в СССР [19] и в США [20, 21]. Результаты этих измерений показали, что изменения температуры поверхности Венеры от дня к ночи малы.

Диапазон длин волн радиоастрономических измерений излучения Венеры включает линии поглощения водяного пара $\lambda = 1,35$ см и аммиака $\lambda = 1,25$ см. Наличие этих газов в атмосфере планеты проявилось бы в уменьшении яркостной температуры радиоизлучения планеты на этих волнах. Отсутствие такого уменьшения дало возможность оценить относительное содержание водяного пара в подоблачной атмосфере Венеры как $f_{\text{H}_2\text{O}} = 0,001 \pm 0,001$ и аммиака как $f_{\text{NH}_3} < 1,6 \cdot 10^{-5}$ [17].

На рис. 5.1 приведен также расчетный частотный спектр радиоизлучения Венеры $T_{\text{я}}(\lambda)$ для атмосферы, содержащей 0,1% H_2O и 97% CO_2 . Хорошее согласие с экспериментальными данными в диапазоне длин волн $\lambda \leq 10$ см не требует привлечения каких-либо дополнительных поглощающих компонентов в атмосфере Венеры. Это дало возможность определить верхний предел интегрального содержания воды в жидкой фазе: $B < 0,3 \text{ г}\cdot\text{см}^{-2}$. При толщине облачного слоя 7—8 км это соответствует верхнему пределу влажности облаков: $M < 0,4 \text{ г}\cdot\text{м}^{-3}$ [22].

5.2. МЕРКУРИЙ, МАРС

Отличительной особенностью Меркурия и Марса является их разреженная атмосфера, слабо влияющая на тепловой режим. Поэтому обе указанные планеты должны, подобно Луне, иметь зависимость яркостной температуры радиоизлучения от суточной фазы и от длины волны. Исследование этих зависимостей дает возможность определять тепловые и электрические параметры поверхности.

Первые в СССР измерения радиоизлучения Меркурия были проведены в 1964 г. Б.Г. Кутузой, Б.Я. Лосовским, А.Е. Саломоновичем [23] в 8-миллиметровом диапазоне волн на радиотелескопе РТ-22 ФИАН. Эти измерения показали зависимость усредненной по диску яркостной температуры Меркурия $T_{\text{я}}$ от фазового угла Φ освещенности планеты Солнцем. Последующие измерения, проведенные Б.Я. Лосовским и В.К. Головковым [24], позволили определить величину фазового хода $T_{\text{я}}$.

Теория радиоизлучения Луны, детально разработанная ранее В.С. Троицким [25], не могла быть непосредственно применена к Меркурию из-за большого эксцентриситета его орбиты и значительно большей продолжительности солнечных суток на Меркурии.

В 1967—1968 гг. Ю.Н. Ветухновской и А.Д. Кузьминым [26, 27] была развита теория радиоизлучения Меркурия. На основе анализа результатов советских и зарубежных радиоастрономических измерений ими определены характеристики материала поверхности Меркурия: диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 2,5$, плотность $\rho = 1,2 \text{ г}/\text{см}^3$, параметр тепловой инерции $\gamma = (k\rho C)^{-1/2} = 250 \div 800$, где k — коэффициент теплопроводности, ρ — плотность, C — теплоемкость. Показано также, что материал поверхности Меркурия является хорошим диэлектриком ($\text{tg}\delta = (2 \div 10) \cdot 10^{-3}$).

В 1975 г. В.Д. Кротиковым и О.Б. Шуко [28] проведен расчет теплового режима на разных гермографических долготах и широтах. Вследствие резонансного вращения Меркурия на его поверхности существуют две горячие области ($l = 0$ и 180°) и две холодные ($l = 90$ и 270°). Показано, что полуденная температура горячих областей на 130° выше температуры холодных. Уточнен параметр тепловой инерции ($\gamma = 600 \pm 100$).

Для решения ряда задач астрометрии и небесной механики важны координатные наблюдения планет. Однако вследствие близости Мер-

курия к Солнцу его оптические наблюдения затруднены. В 1978 г. на радиотелескопе РАТАН-600 были проведены радиоастрономические измерения прямых восхождений Меркурия [29]. Впервые в радиоастрономии получена точность координатных измерений планеты, сравнимая с точностью оптических наблюдений.

Первые в СССР радиоастрономические измерения Марса были проведены в 1965 г. Б.Г. Кутузой, Б.Я. Лосовским и А.Е. Саломоновичем [30] на волне 8 мм на радиотелескопе РТ-22 ФИАН. Однако для интерпретации этих и зарубежных данных была необходима теория радиоизлучения Марса, учитывающая особенности его движения и наблюдения. Такая теория была разработана в 1969 г. независимо В.С. Троицким [31] и Ю.Н. Ветухновской, А.Д. Кузьминым, Б.Я. Лосовским [32].

Наблюдения Марса с Земли возможны лишь при малых фазовых углах ($\Phi < 40^\circ$), т.е. измеряется практически лишь освещенная Солнцем полусфера Марса. Троицкий предложил способ определения суточных вариаций температуры по зависимости измеренной яркостной температуры от длины волны. На больших глубинах суточная тепловая волна затухает. Поэтому измерения на достаточно длинных волнах определяют постоянную составляющую суточной температуры. Измерения же на коротких волнах при малых фазовых углах дают околополуденную температуру поверхности. Сочетая эти измерения, можно определить амплитуду суточного изменения температуры поверхности. Однако такая методика применима, лишь если измерения на разных волнах проведены в близкие даты или в одинаковых условиях нагрева планеты Солнцем. Ю.Н. Ветухновская, А.Д. Кузьмин и Б.Я. Лосовский показали, что из-за эксцентриситета орбиты и наклона оси вращения среднесуточная температура Марса значительно изменяется при движении по орбите. Выполненные ими расчеты дали возможность приводить все измерения к одинаковым условиям и использовать таким образом все имеющиеся данные.

На основе использования указанных теоретических моделей и данных более точных измерений радиоизлучения Марса Ю.Н. Ветухновской, А.Д. Кузьминым и Б.Я. Лосовским [32, 33] и В.А. Ефановым, А.Г. Кисляковым, И.Г. Моисеевым и др. [34] определены основные электрические и тепловые характеристики его поверхности: диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 3,5$, удельный угол потерь $\text{tg}\delta/\rho = (2\div 5) \cdot 10^{-3}$, плотность $\rho = 1,7 \text{ г/см}^3$, глубина проникания электрической волны $l_e = 10 \lambda$. Таким образом, вещество поверхности Марса является хорошим диэлектриком. Нормированное отношение глубин проникания электрической и суточной тепловой волны $m = l_e/\lambda_{\text{т}} = 10$, откуда глубина проникания суточной тепловой волны $l_{\text{т}} = 1 \text{ см}$.

В 1970 г. в СССР был создан космический радиотелескоп, в состав которого входили автоматически действующий радиометр на волну 3,4 см, осуществляющий прием радиоизлучения в двух ортогональных поляризациях, и антенна диаметром 0,6 м [35]. Радиометр был установлен на борту автоматической межпланетной станции

"Марс-3", выведенной в 1971 г. на орбиту искусственного спутника Марса. Это впервые дало возможность провести радиоастрономические исследования Марса с высоким разрешением (150 км по поверхности планеты) [36]. Аналогичный эксперимент был повторен в 1973 г. на АМС "Марс-5" [37]. Результаты поляризационных измерений показали изменения диэлектрической проницаемости материала поверхности в разных районах в пределах 2—7, что соответствует изменению плотности от 0,8 до 3,3 г/см³. Среднее значение ϵ марсианского грунта составило 3,5 в хорошем согласии с данными наземных измерений.

Исследование крупномасштабных неоднородностей поверхности Марса с помощью наземного радиотелескопа было проведено с 1969 по 1977 г. С.О. Кузьминым и Б.Я. Лосовским [38]. Ими выявлена зависимость усредненной по диску яркостной температуры от долготы центрального ареографического меридиана. Выявлены две области повышенной радиояркостности в районе Тарсис и Япигия и области пониженной радиояркостности — Амазония и Срединный залив.

5.3. ЮПИТЕР

Радиоизлучение Юпитера имеет три компонента, обусловленные различными механизмами и разными областями излучения. На сантиметровых волнах преобладает тепловая компонента излучения диска, несущая информацию о самой планете. На дециметровых и метровых волнах основной вклад вносит нетепловое радиоизлучение радиационных поясов Юпитера. На декаметровых волнах излучение носит спорадический импульсный характер.

Первые в Советском Союзе наблюдения радиоизлучения Юпитера были проведены в 1961 г. на радиотелескопе РТ-22 ФИАН А.Д. Кузьминым и А.Е. Саломоновичем [8] и В.П. Бибиновой и др. [10]. Выявлено возрастание яркостной температуры Юпитера с увеличением длины волны. Предложена интерпретация этой зависимости, согласно которой излучение более длинных волн исходит из более глубоких слоев атмосферы, температура которой увеличивается с глубиной.

Для количественного анализа наблюдательных данных было необходимо разделить излучение диска Юпитера и радиоизлучение радиационных поясов. Такие измерения, требующие высокого углового разрешения, были проведены на радиотелескопе БПР ГАО в 1963 г. Д.В. Корольковым, Ю.Н. Парийским, Г.М. Тимофеевой на волне 3,02 см [39] и В.Я. Гольневым, Н.М. Липовкой и Ю.Н. Парийским на волне 6,5 см [40]. В 1968 г. Н.С. Соболева и Г.М. Тимофеева [41] выделили излучение диска и построили его спектр. По результатам этих измерений Ю.Н. Парийский [42] произвел первую оценку химического состава подоблачной атмосферы: относительное содержание гелия и водорода в атмосфере Юпитера $f_{\text{He}} = 0,15$ и аммиака $f_{\text{NH}_3} = 3 \cdot 10^{-4}$. Однако положенная им в основу расчета поглощения в аммиаке формула Ван Флека—Вайскопфа неприменима для больших давлений, имеющих место в глубоких слоях подоблачной атмосферы Юпитера. А.Д. Кузьмин и Т.В. Смир-

118

нова [43] провели более корректный расчет на основе формулы Бен-Ровена для больших давлений. Полученная ими оценка относительного содержания аммиака ($f_{\text{NH}_3} = (1,4^{+5}_{-1}) \cdot 10^{-4}$) согласуется с оценкой Ю.Н. Парийского, но является более надежной.

Высокое разрешение радиотелескопа БПР дало возможность оценить некоторые свойства радиационных поясов Юпитера. Оказалось, что с ростом частоты области радиоизлучения приближаются к поверхности, что указывает на более крутой энергетический спектр электронов во внутренних частях поясов радиации.

На метровых волнах измерения осложнены наличием большого числа мешающих радиисточников и требуют крупных радиотелескопов и специальных методов выделения радиоизлучения Юпитера. Первые в СССР измерения радиоизлучения Юпитера на метровых волнах ($\lambda = 2,94$ м) проведены на радиотелескопе ДКР-1000 ФИАН В.С. Артюхом, А.Д. Кузьминым и А.Н. Макаровым [44]. Полученная яркостная температура $\bar{T}_\gamma = 3,8 \cdot 10^5$ К подтверждает нетепловой характер радиоизлучения в этом диапазоне.

Детальные исследования радиоизлучения Юпитера на метровых волнах были проведены в 1974—1978 гг. А.Г. Соловьевым и Б.Я. Лосовским [45, 46]. Построен спектр радиоизлучения планеты в диапазоне дециметровых—метровых волн, на основе которого делается вывод, что ближе к поверхности энергетический спектр излучающих частиц в радиационных поясах более жесткий. Оценена степень линейной поляризации радиоизлучения Юпитера на волне $\lambda = 3$ м ($p = 26 \pm 8\%$). На основе совпадения значения этого параметра с измеренным в дециметровом диапазоне (24%) и вдвое меньшей по сравнению с расчетом степени поляризации А.Г. Соловьев [47] показал, что анизотропия углового распределения электронов по питч-углам уменьшается при увеличении энергии, обусловленном, по-видимому, питч-угловым рассеянием электронов на низкочастотных электромагнитных волнах типа свистящих атмосфериков в радиационном поясе Юпитера. По величине степени линейной поляризации он оценил также плотность "холодной" (< 10 К) плазмы в радиационном поясе $N_e = 150 \pm 50$ см $^{-3}$ и указал, что ее основным источником является спутник Ио. Им установлено, что энергетический спектр излучающих частиц, а следовательно, и частотный спектр излучения определяются внутренним источником частиц. Оценена мощность этого источника, на два порядка превышающая мощность источника частиц на Сатурне.

Переходя к спорадическому радиоизлучению на декаметровых волнах, следует сказать, что его характер существенно отличается от радиоизлучения других планет. Наиболее интересной особенностью этого излучения, открытой Э. Биггом, является его модуляция спутником Юпитера Ио [48]. По длительности импульсов-всплесков спорадическое радиоизлучение Юпитера разделяют на тип *L* с временным масштабом от единиц до десятков секунд и тип *S* с временным масштабом от единиц до десятков миллисекунд. Исследования, проводимые в СССР, посвящены в основном изучению спорадического излучения *S*-типа.

Наиболее детальные исследования структуры всплесков S -типа проведены в 1980—1982 гг. Б.П. Рябовым, А.В. Архиповым и В.А. Шевченко [49] на радиотелескопе УТР-2 РИАН УССР в диапазоне частот 10—25 МГц. Сочетание большой эффективной площади и длительного времени слежения этого радиотелескопа позволило получить крупномасштабные динамические спектры S -бурь для полного временного интервала каждой бури. Подтверждено, что появление мощных S -бурь полностью контролируется положением Ио на орбите. Они группируются около двух значений фазового угла Ио: $\Phi_{\text{Ио}1,2} = 86^\circ$ и 234° . Все S -бури испытывают групповой частотный дрейф. Скорости дрейфа изменяются от одной бури к другой в пределах 60—600 кГц/мин. В полосе $\Phi_{\text{Ио}1}$ скорость частотного дрейфа положительна, в полосе $\Phi_{\text{Ио}2}$ — отрицательна. На основании этого Б.П. Рябовым [50] сделан вывод о частотно-зависимой диаграмме направленности S -излучения: отмечена локализация области генерации S -бурь в южной полярной области Юпитера. Выдвинута гипотеза, что основным фактором, контролирующим условия возникновения и параметры S -бурь, является поперечная скорость южного конца трубки Ио относительно плазмы ближней магнитосферы Юпитера. Обнаружено запаздывание главных максимумов средней мощности, максимальной частоты и скорости частотного дрейфа S -бурь от долготы максимумов угловой и линейной скоростей подошвы трубки Ио.

В.В. Зайцевым, Е.Я. Злотник и В.Е. Шапошниковым [51] предложена и разработана схема, позволяющая объяснить единым образом совокупность наблюдаемых свойств всплесков: частотный спектр, корреляцию с фазой Ио, высокую направленность излучения, отрицательный частотный дрейф, квазипериодические последовательности S -всплесков. Механизм генерации основан на возбуждении неравновесными электронами в магнитной трубке Ио плазменных волн на частотах, близких к электронной гирочастоте, и конверсии их в быструю необыкновенную волну за счет индуцированного рассеяния на неравновесных ионах. Квазипериодичность реализуется в результате пульсирующего режима конверсии плазменных волн в необыкновенную электромагнитную волну.

5.4. САТУРН, УРАН

Первые в Советском Союзе радиоастрономические наблюдения Сатурна были проведены в 1964 г. Б.Г. Кутузой, Б.Я. Лосовским и А.Е. Саломоновичем [52] на радиотелескопе РТ-22 ФИАН на волне 8 мм.

На основе имеющихся данных о радиоизлучении Сатурна в диапазоне длин волн от 8 мм до 21 см А.Д. Кузьмин, А.П. Наумов и Т.В. Смирнова [53] получили оценку содержания аммиака в подоблачной атмосфере Сатурна $f_{\text{NH}_3} = (3 \div 5) \cdot 10^{-5}$, что существенно меньше космической распространенности, а также относительного содержания аммиака в атмосфере Юпитера.

Первые в СССР радиоастрономические наблюдения Урана были проведены в 1970 г. А.Д. Кузьминым и Б.Я. Лосовским [54] также

на радиотелескопе РТ-22 ФИАН на волне 8 мм. Показано, что данные радиоастрономических наблюдений указывают на наличие в атмосфере Урана насыщенного аммиака и, следовательно, аэрозоля из твердого аммиака.

5.5. СПУТНИКИ ПЛАНЕТ

Спутники планет имеют значительно меньшие размеры и соответственно более чем на 2 порядка меньшие плотности потоков радиоизлучения. Поэтому радиоастрономические наблюдения спутников планет оказались возможными лишь после существенного повышения чувствительности радиотелескопов.

Первое в СССР измерение радиоизлучения спутника планеты — спутника Юпитера Каллисто — было проведено в 1971 г. А.Д. Кузьминым и Б.Я. Лосовским [55] на радиотелескопе РТ-22 ФИАН на волне 8 мм. Полученная яркостная температура $T_y = 280 \pm 120$ К, значительно превышающая равновесную, подтвердила выдвинутую ранее этими же авторами [56] гипотезу ледяной поверхности Каллисто с толщиной ледяного покрова не менее 100 км.

В 1975—1976 гг. А.Б. Берлин, Н.А. Есепкина, Ю.Н. Зверев и др. [57] провели на радиотелескопе РАТАН-600 измерения трех галилеевских спутников Юпитера — Европы, Ганимеда и Каллисто на волнах 2,08 и 3,95 см и получили более точные значения яркостных температур, которые, однако, также значительно превышают равновесные температуры. Радиоизлучение Европы зарегистрировано впервые. Превышение температуры над равновесной интерпретировано радиоактивным разогревом поверхности. Радиоактивность возникает при взаимодействии с поверхностью космических лучей или при аккреции радиоактивной пыли. Кроме слабого потока радиоизлучения, радиоастрономические измерения спутников планет затруднены сильным мешающим излучением находящейся на малом угловом расстоянии самой планеты. В 1976 г. М.Г. Мингалиев, Ю.Н. Парийский и З.Е. Петров с помощью радиотелескопа РАТАН-600 зарегистрировали радиоизлучение самого внутреннего из галилеевских спутников Юпитера — Ио на волне 3,9 см. В 1978 г. ими обнаружено излучение Ио также на волне 2,08 см [58]. Измеренные на этих волнах яркостные температуры (189 ± 38 и 600 ± 120 К) указывают на наличие у Ио магнитосферы и поясов радиации. Оценена величина магнитного поля (< 1 Э).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Радиоастрономические исследования в СССР дали ряд принципиально новых данных о планетах Солнечной системы.

Проведены измерения частотного спектра и распределения радиояркостности по диску планеты Венера. Доказан тепловой механизм радиоизлучения. Определена температура поверхности Венеры. Определен радиус поверхности планеты. Проведены измерения фазовой зависимости температуры и показано малое ее изменение от дня

к ночи. Оценено содержание водяного пара в атмосфере и водность облаков Венеры.

Развита теория радиоизлучения Меркурия. Определены физические характеристики материала его поверхности.

Разработана теория радиоизлучения Марса. Определены электрические и тепловые характеристики материала поверхности. С помощью первого советского радиотелескопа на борту искусственного спутника Марса проведены радиоастрономические исследования Марса с высоким разрешением (150 км).

Проведены измерения радиоизлучения Юпитера с высоким разрешением. Измерен частотный спектр. Оценен химический состав атмосферы. Выявлены вековые вариации радиоизлучения. Оценен энергетический спектр заряженных частиц в магнитосфере Юпитера. Показано наличие в радиационных поясах холодной плазмы и оценена ее плотность. Исследована структура миллисекундных всплесков декаметрового радиоизлучения Юпитера. Разработана теория происхождения этих всплесков, включая их корреляцию с фазой спутника Юпитера Ио.

Оценено содержание аммиака в атмосфере Сатурна.

Впервые наблюдалось радиоизлучение спутников Юпитера Европа и Ио. Показано наличие у Ио магнитосферы и поясов радиации.

Полученные данные существенно углубили физику планет, а также были использованы для разработки космических аппаратов, создаваемых для исследования планет. В частности, в конструкциях аппаратов серии "Венера" были предусмотрены теплозащита и парашют из термостойкой ткани. В свою очередь, прямые измерения с АМС "Венера-7 и -8" подтвердили высокую температуру поверхности.

Глава 6

РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛАНЕТ В СОВЕТСКОМ СОЮЗЕ

ВВЕДЕНИЕ

Радиолокационные исследования небесных тел представляют одно из важнейших направлений современной радиоастрономии. Основной методической особенностью этих исследований является использование радиоизлучения, отраженного от изучаемого объекта.

Возможность радиолокационных исследований Луны в Советском Союзе была теоретически обоснована в работах Л.И. Мандельштама и Н.Д. Папалекси [1], а практически осуществлена в НИРФИ (г. Горький) под руководством М.М. Кобрина [2]. В экспериментах, осуществленных на волнах 10 и 3 см, было найдено, что эффективная площадь обратного рассеяния¹ Луны составляет 0,07 от площади ее по-

¹ Эффективная площадь обратного рассеяния цели — это площадь, перехватывающая такое количество энергии, которое, будучи рассеянным равномерно во всех направлениях, создает у радиолокатора сигнал, равный отраженному от цели.

перечного сечения. Обнаружено, что характер отражения Луной радиоволн сильно отличен от характера отражения ею волн оптического диапазона. Отражает в основном центральная часть видимого диска Луны.

Радиолокационные исследования планет в Советском Союзе проводятся Институтом радиотехники и электроники АН СССР (ИРЭ АН СССР) совместно с рядом других организаций. Они вылились в новое направление наблюдательной астрономии [3]. Применение радиолокационных методов оказалось особенно плодотворным в исследованиях Венеры, поверхность которой закрыта непроницаемой в видимом свете атмосферой. Прозрачность атмосферы Венеры для волн дециметрового диапазона позволила получить с помощью радиолокации первые сведения о ее поверхности, определить период и направление ее вращения, провести исследования ее атмосферы.

Подготовка к радиолокации планеты Венера началась в середине 1960 г. по инициативе академика В.А. Котельникова — директора ИРЭ АН СССР. Для осуществления радиолокации Венеры были приспособлены антенна и передатчик на волну 39 см Центра дальней космической связи в Крыму. Первые радиолокационные наблюдения Венеры были проведены с 18 по 26 апреля 1961 г. [4] в период нижнего соединения (одновременно в этот же период успешные наблюдения Венеры были осуществлены в США и Великобритании).

В результате радиолокационных наблюдений 1961 г. в Советском Союзе был обнаружен отраженный Венерой сигнал и измерены его параметры, позволившие оценить эффективную площадь обратного рассеяния Венеры, период ее вращения, а также измерить расстояние и радиальную скорость планеты и определить величину астрономической единицы. Было найдено, что эффективная площадь обратного рассеяния Венеры составляет 0,08 от площади поперечного сечения планеты, период вращения Венеры превышает 100 земных суток, а величина астрономической единицы равна $149\,599\,300 \pm 650$ км.

В следующем нижнем соединении Венеры в 1962 г. благодаря повышению энергетического потенциала радиолокационной установки стало возможным провести измерения расстояния до Венеры на протяжении двух месяцев и изучить важные физические характеристики планеты. Были определены период и направление вращения Венеры. Впервые с высоким разрешением получено распределение энергии отраженных сигналов в зависимости от их запаздывания, позволившее установить природу отражающей поверхности Венеры. Изучались вариация эффективной площади обратного рассеяния Венеры и деполяризация волн при отражении от ее поверхности [5,6].

В том же году впервые были обнаружены сигналы, отраженные Меркурием, и установлено, что эта планета отражает радиоволны примерно так же, как и Луна [7]. Проводились эксперименты по обнаружению сигналов, отраженных Марсом и Юпитером [8, 9].

Для обработки радиолокационных наблюдений Венеры 1964 г. была использована ЭВМ типа БЭСМ-2М. Высокая точность спектральных измерений, достигнутая за счет применения ЭВМ, позволила обнаружить в спектре отраженного Венерой сигнала детали, обусловленные локальными областями поверхности планеты, имеющими на радиовол-

нах более высокую отражательную способность, чем окружающая местность [10].

Исследование спектральных деталей было продолжено по наблюдениям Венеры в 1966 г., проводившимся совместно с радиоастрономической обсерваторией Джодрел-Бэнк Манчестерского университета [11]. По перемещению деталей в спектре отраженного сигнала, полученного в нижних соединениях 1964 и 1966 гг., определены координаты "ярких" областей и проведено уточнение периода и ориентации оси вращения Венеры [12].

С 1969 г. с помощью радиолокационной установки в Крыму проводились регулярные измерения расстояния и радиальной скорости Венеры (а в 1971 г. и Марса) с целью прогнозирования положения планеты в период подлета к ней межпланетных станций. Исследовались рельеф поверхности Венеры и вариации ее характеристик отражения [13].

С 1961 по 1971 г. энергетический потенциал радиолокационной установки возрос в 70 раз за счет повышения мощности передатчика, усовершенствования антенны, приемника и методов обработки отраженного сигнала. Возможности исследования планет радиолокационным методом резко расширились в связи с созданием новой антенны Центра дальней космической связи диаметром 70 м, позволившей увеличить энергетический потенциал радиолокатора еще в 50 раз.

В феврале—апреле 1980 г. с помощью новой антенны была проведена серия радиолокационных наблюдений планет Венера, Меркурий и Марс [14]. При наблюдении Венеры среднеквадратичное значение ошибки измерения расстояния составляло 300—500 м (при дальности до 140 млн км), при наблюдении Марса и Меркурия, а также Венеры на большей дальности эта ошибка не превышала 1,5 км. Полученные данные совместно с опубликованными данными предыдущих радиолокационных и оптических наблюдений планет в СССР и США были использованы для построения единой релятивистской теории движения внутренних планет Солнечной системы [15]. Высокая точность измерений позволила провести исследования высотного рельефа Марса вдоль параллели 21° с.ш.

Радиолокационные наблюдения Венеры с Земли создали предпосылки для осуществления принципиально нового эксперимента — радиолокационной съемки поверхности Венеры с ее искусственного спутника. Установка радиолокатора на искусственном спутнике позволяет обеспечить достаточное превышение сигнала над шумами, необходимое для получения детальных изображений поверхности планеты, а также создает одинаковые условия наблюдения различных районов.

Уникальный космический эксперимент был осуществлен в 1983—1984 гг. с помощью космических аппаратов "Венера-15 и -16". Радиолокационная система, состоящая из радиолокационной станции бокового обзора с синтезом апертуры и радиовысотомера, была разработана в ОКБ Московского энергетического института. Отраженные сигналы передавались по радиолинии на Землю для создания радиолокационных изображений и измерения высотного рельефа поверхности Венеры. Обработка отраженных сигналов осуществлялась с помощью ЭВМ

в ИРЭ АН СССР, где была предложена идея эксперимента и разработаны его научно-методические основы [16, 17].

Для успешного осуществления эксперимента надо было знать средние характеристики отражения поверхности Венеры, поглощение и рефракцию радиоволн в ее атмосфере. Построение сплошных изображений из отдельных полос ежедневной съемки нельзя было осуществить, не зная точно угловой скорости вращения Венеры и ориентации оси вращения в пространстве.

Наиболее значительные результаты получены в ходе реализации обширной программы радиолокационных экспериментов по изучению планеты Венеры. Эта глава посвящена в основном исследованию физических характеристик поверхности и атмосферы Венеры. Вначале излагаются методика и результаты наблюдений с Земли, а затем — с космических аппаратов "Венера-15 и -16".

6.1. ХАРАКТЕРИСТИКИ ОТРАЖЕНИЯ ВЕНЕРЫ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ С ЗЕМЛИ

Методика измерения диаграммы обратного рассеяния. Диаграмма обратного рассеяния устанавливает зависимость энергии волн, отраженных в направлении источника некоторым участком поверхности, от угла падения или, что в данном случае одно и то же, угла наблюдения. Это частный случай фотометрической функции, имеющий место при совпадении направлений на источник и наблюдателя.

Диаграмму обратного рассеяния можно получить из распределения отражательной способности по диску планеты, предположив, что поверхность ее имеет однородную структуру и одинаковые электрические свойства. При этом сравнивают энергию волн, отраженных участками поверхности планеты, ориентированными под разными углами к падающему лучу, вместо того чтобы сравнивать энергии волн, отраженных одним определенным участком при различных углах наблюдения.

При исследовании характеристик отражения поверхности планет радиолокационным методом используется разделение отраженных сигналов по времени их запаздывания и по доплеровскому смещению частоты. В соответствии с этим непосредственно получают распределение энергии отраженных сигналов по времени запаздывания, по доплеровскому смещению частоты (доплеровский спектр) или двумерное распределение по времени запаздывания и доплеровскому смещению.

Из рис. 6.1, на котором изображена сферическая поверхность планеты, освещаемая с Земли радиолучом 1, следует, что одинаковое запаздывание имеют сигналы, отраженные точками некоторой окружности 2, плоскость которой перпендикулярна радиолучу 1. Эти точки находятся на одном расстоянии от антенны радиолокатора. Разделение отраженных сигналов по времени их запаздывания дает распределение отражательной способности вдоль радиолуча (по оси u).

Вращение планеты вызывает расширение спектральной линии отраженного сигнала. Одинаковое доплеровское смещение имеют сигналы, отраженные точками некоторой окружности 3, плоскость которой па-

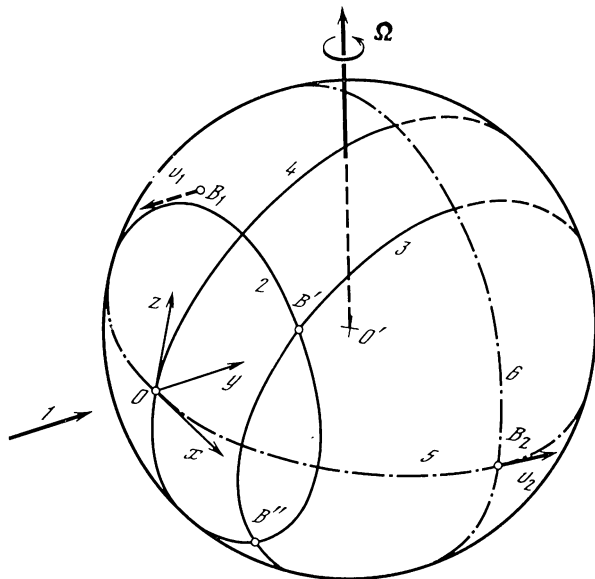


Рис. 6.1. Линии равных запаздываний (2) и равных доплеровских смещений (3) на поверхности планеты

1 — направление радиолуча; 4 — видимый центральный меридиан; 5 — видимый экватор; 6 — граница видимого диска планеты (лимб); O — центр диска; Ω — вектор угловой скорости видимого вращения; u_1, u_2 — радиальные составляющие скорости вращения краев видимого диска (B_1, B_2)

раллельна плоскости видимого центрального меридиана² 4. Эти точки имеют одинаковую радиальную составляющую скорости относительно антенны радиолокатора. Разделение отраженных сигналов по доплеровскому смещению частоты дает распределение отражательной способности вдоль проекции видимого экватора 5 на диск планеты (по оси x).

Характер отражения радиоволн. Распределение энергии отраженных Венерой сигналов по времени запаздывания $P(\tau)$ на волне 39 см, полученное по наблюдениям Венеры 1962 г. в Крыму [5], представлено на рис. 6.2. Диаграмма направленности антенны радиолокатора значительно шире угловых размеров планеты, что обеспечивало одинаковую мощность потока падающего излучения по видимому диску планеты.

Как следует из рис. 6.2 (см. врезку), для всех точек окружности 2 угол φ , составляемый падающим лучом с нормалью n к средней поверхности планеты (сфере) в данной точке, имеет одинаковое значение, причем

$$\varphi = \arccos(1 - y) \quad (6.1)$$

(y выражено в долях радиуса планеты a_0).

² Направление оси видимого вращения Венеры, определяемого суммой собственного вращения планеты и ее перемещением относительно антенны радиолокатора, заметно отличается от направления оси собственного вращения ввиду медленного вращения Венеры.

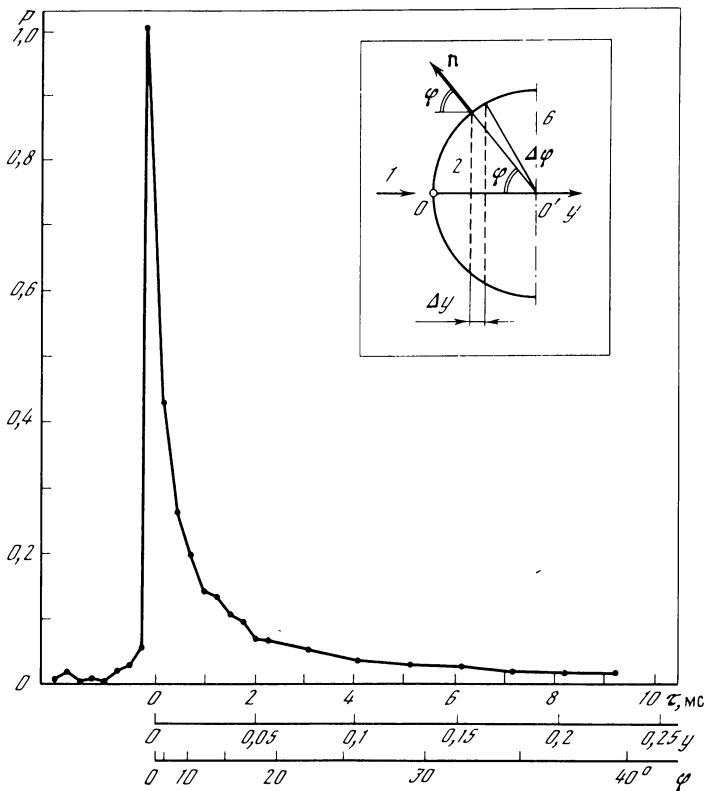


Рис. 6.2. Распределение энергии отраженных Венерой сигналов по времени запаздывания по наблюдениям на волне 39 см [5]

Начало координат соответствует ближайшей к антенне радиолокатора точке планеты (центру диска O). Разрешающая способность 305 и 1020 мкс ($a_0 \Delta y = 46$ км и 153 км). Разница в энергии отраженного сигнала, которая пропорциональна величине разрешающей способности, устранена. Значения P отнесены к максимальному в начале координат; y выражено в долях радиуса планеты a_0 . Обозначения те же, что на рис. 6.1.

При разделении отраженных сигналов по времени запаздывания при данном значении y принимаются сигналы, отраженные боковой поверхностью шарового слоя, высота которого определяется разрешающей способностью Δy (см. врезку на рис. 6.2). Если измерения энергии отраженных сигналов проводились с одной разрешающей способностью (или приведены к ней, как на рис. 6.2), то площадь боковой поверхности шарового слоя ($2\pi a_0 \Delta y$), видимой из центра планеты под углом φ , по свойству сферы от φ не зависит. Следовательно, распределение $P(y)$, представленное на рис. 6.2, одновременно является диаграммой обратного рассеяния Венеры $P(\varphi)$.

Наиболее характерной особенностью распределения $P(y)$ (см. рис. 6.2) является резкое уменьшение интенсивности волн, отраженных к источнику, когда падающий луч не совпадает с нормалью к средней поверхности планеты n . Это явление отражает тот обнаруженный радио-

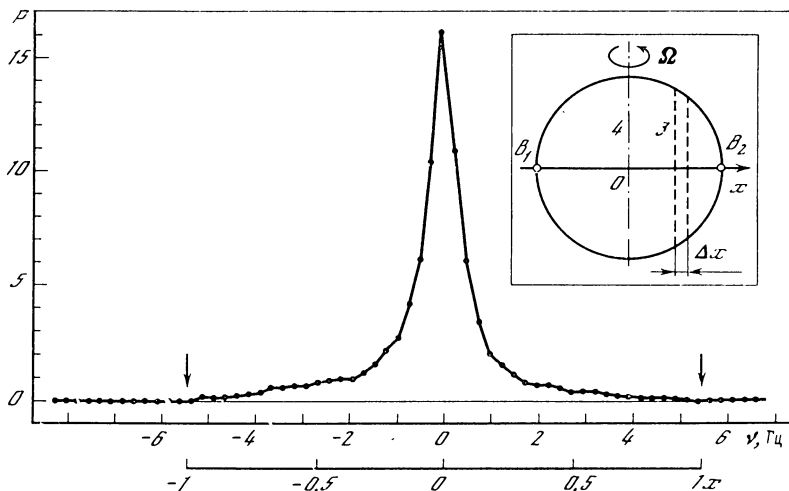


Рис. 6.3. Доплеровский спектр отраженных Венерой сигналов по наблюдениям на волне 39 см [11]

Значения x отсчитываются от видимого центрального меридиана. Разрешающая способность 0,244 Гц ($a_0 \Delta x = 275$ км). Значения P отнесены к средней мощности шума; x выражено в долях радиуса планеты a_0 . Обозначения те же, что на рис. 6.1

локацией факт, что в центре диска планеты наблюдается зеркальный блик³. Наличие зеркального блика в центре диска планеты следует также из рис. 6.3, на котором представлен доплеровский спектр $P(\nu)$ отраженных Венерой сигналов на волне 39 см.

Зеркальный характер отражения радиоволн Венерой подтверждается поляризационными измерениями: на волне 39 см при отражении деполяризуется менее 0,1 от всей энергии, отраженной к источнику [6]. Это свойство обнаружено также у других планет и Луны. В то же время при наблюдении планет в видимых лучах зеркальное отражение, как известно, отсутствует.

Можно полагать, что зеркальное отражение обусловлено элементами поверхности, размер и радиус кривизны которых много больше длины волны. Эти элементы дают интенсивное обратное отражение, когда занимают по отношению к падающему лучу перпендикулярное положение.

Модели зеркального отражения. Теоретическому исследованию диаграммы обратного рассеяния поверхности Луны и планет в случае, когда некоторый характерный размер неровностей много больше длины волны, посвящено большое число работ (см. обзоры [18, 19]). Обычно в таких исследованиях статистические свойства поверхности описываются с помощью пространственной автокорреляционной функции $\rho(l)$ и стандартного отклонения высот относительно средней поверхности σ_h ; распределение высот предполагается нормальным. Скорость

³ Для зеркально гладкой сферы вся отраженная к источнику энергия сосредоточена вблизи начала координат.

убывания пространственной автокорреляционной функции с увеличением сдвига вдоль поверхности характеризует размер неровностей, играющих роль в процессе отражения.

Обычно рассматривают два вида пространственной автокорреляционной функции:

а) гауссову

$$\rho(l) = \exp(-l^2/l_0^2), \quad (6.2)$$

б) экспоненциальную

$$\rho(l) = \exp(-|l|/l_0), \quad (6.3)$$

где l_0 — характерный размер, показывающий, на каком расстоянии корреляция уменьшается в e раз.

Вопрос отражения волн от поверхности, имеющей протяженный рельеф случайного профиля (волнистая поверхность), впервые был рассмотрен М.А. Исаковичем [20]. Им получено выражение для угловых характеристик рассеяния при гауссовой автокорреляционной функции. В случае обратного отражения это выражение приводит к виду (при нормировке к величине, соответствующей $\varphi = 0$)

$$P_s(\varphi) = \exp(-B \operatorname{tg}^2 \varphi) / \cos^4 \varphi, \quad (6.4)$$

где $B = l_0^2 / 4\sigma_h^2$.

Хотя вывод был сделан применительно к звуковым волнам, то же самое выражение было получено позднее Хэгфорсом [21] для диаграммы обратного рассеяния в случае электромагнитных волн и диэлектрической поверхности. В этой же работе было найдено выражение для диаграммы обратного рассеяния в случае диэлектрической волнистой поверхности при экспоненциальной автокорреляционной функции

$$P_s(\varphi) = (\cos^4 \varphi + C \sin^2 \varphi)^{-1/2}, \quad (6.5)$$

где $C = (\lambda l_0 / 4\pi \sigma_h^2)^2$.

В работе [21] сделан важный вывод о том, что обратное отражение от волнистой поверхности, размер элементов и радиус кривизны которой много больше длины волны, не сопровождается деполяризацией.

Обе формулы выведены в предположении, что крутизна скатов не очень велика и можно пренебречь многократным отражением. При выводе не учитывалось взаимное затенение элементов. Поэтому формулами можно пользоваться при не очень больших углах φ , когда затенение еще мало.

В работе [22] на основе анализа распределения $P(\tau)$ (см. рис. 6.2) было показано, что зависимость, соответствующая экспоненциальной автокорреляционной функции, дает значительно лучшее приближение. В пределах случайных ошибок не обнаруживается каких-либо систематических отклонений экспериментальных точек относительно кривой (по крайней мере до $\varphi = 35^\circ$). При больших значениях аргумента должно было бы проявиться изменение характера отражения волн, но чувствительность аппаратуры была недостаточна, чтобы получить отражения при больших углах падения.

Существовало мнение, что пространственная автокорреляционная функция поверхностных структур, обуславливающая зеркальное отра-

жение, должна быть близка к гауссовой. Экспоненциальная автокорреляционная функция отвергалась на том основании, что она претерпевает излом в начале координат и у нее не существует второй производной. Соответствующий этой автокорреляционной функции случайный рельеф должен содержать в заметном количестве структуры с вертикальными стенками, что протеворечит принятой модели.

Вероятно, ни один из двух рассмотренных простых законов не представляет фактическую корреляцию высот поверхности. Очевидно, при теоретическом исследовании рассеяния волн неровными поверхностями следует учитывать структуры, характерный размер которых не только много больше или меньше длины волны (как делалось обычно), но и соизмерим с ней. В то же время для практических целей представление диаграммы обратного рассеяния однопараметрической формулой (6.5) является удобным, хотя теоретические предпосылки, принятые при ее выводе, противоречивы.

Добавим, что при анализе распределения $P(x)$ для волны 39 см (см. рис. 6.3) были получены близкие значения параметра C : 220 для левого крыла и 265 для правого, которое несколько круче [22, 23]. В этих же работах была сделана оценка влияния рефракции радиоволн в атмосфере Венеры на форму наблюдаемой диаграммы направленности. Показано [23], что для не очень больших углов падения это влияние можно учесть изменением параметра C . Если C — наблюдаемое значение, то фактическое значение

$$C_0 \approx C + 2C(n_0 - 1),$$

где n_0 — коэффициент преломления газа у поверхности планеты. При $C = 240$ и $n_0 - 1 = 0,017$ (см. разд. 6.2) $C_0 = 248$. Таким образом, атмосферная рефракция занижает величину параметра C всего на 3—4%. Это значительно меньше других ошибок определения C , составляющих обычно 10—20%.

Спектральная зависимость параметра C ; наивероятное значение углов наклона поверхности. Значения параметра C , найденные разными авторами, часто существенно отличаются, хотя используется один и тот же наблюдательный материал. Например, Бекман и Клемперер [24] получили для поверхности Луны $C = 85$ и 21 на волнах 68 и 3,6 см, в то время как в оригинальной работе [25] $C = 102$ и 32. Для поверхности Венеры на волне 12,5 см в работе [24] получено $C = 140$, а в работе [26] — 240 и даже 470.

Отчасти это объясняется разной методикой определения C . Например, в работе [24] для определения C используется кривая полной диаграммы обратного рассеяния, тогда как в работах [25, 19] предварительно вычитается диффузная составляющая. Более существенным является различная разрешающая способность радиолокационных измерений, влияние которой обычно не учитывается⁴.

В [23] был предложен достаточно простой и наглядный метод учета

⁴ Различной разрешающей способностью измерительной и анализирующей аппаратуры объясняется, в частности, менее резкая зависимость энергии отраженных Венерой сигналов от времени их запаздывания в 1962 г. по сравнению с 1964 г., что первоначально было интерпретировано как изменение отражающих свойств поверхности планеты [27].

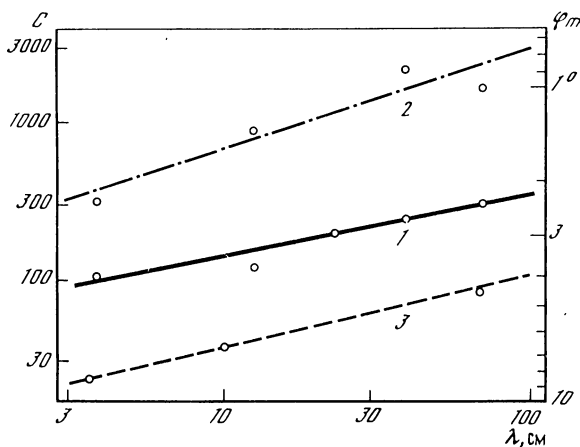


Рис. 6.4. Спектральная зависимость параметра C и наиболее вероятного значения углов наклона поверхности φ_m для Венеры (1), Марса (2) и Луны 1(3)

разрешающей способности измерений при определении параметра C по экспериментальным данным. Как показал анализ экспериментальных данных, неучет разрешающей способности занижает значение параметра C в некоторых случаях на величину до 30%.

Результаты определения параметра C поверхности Венеры по радиолокационным наблюдениям в диапазоне длин волн 3,8—70 см показаны на рис. 6.4. Спектральную зависимость параметра C можно аппроксимировать степенной функцией

$$C = 57\lambda^{0.19}. \quad (6.6)$$

Значения коэффициента пропорциональности (который равен величине C при $\lambda = 1$ см) и показателя степени были найдены методом наименьших квадратов по экспериментальным точкам. Соответствующие зависимости представлены на рис. 6.4 прямыми. Для сравнения на рисунке приведены также аналогичные зависимости для Луны и Марса [23].

При описанной выше методике параметр C определяется по распределению отражательной способности в небольшой области поверхности в центре видимого диска планеты. Радиус этой области, измеренный из центра планеты, в большинстве случаев не превышает 10% [23]. Благодаря этому можно исследовать отражающие свойства отдельных областей поверхности, которые проходят через центр диска вследствие вращения планеты. В окрестностях центра диска волны проходят в атмосфере планеты одинаковый путь, и на определение параметра C не влияет атмосферное поглощение.

При обработке трех серий наблюдений Венеры в Крыму на волне 39 см в 1972, 1975 и 1977 гг. [13], включающей 450 отдельных измерений, было найдено, что значение параметра C изменяется от 50 до 600 [13]. Среднее значение C близко к 350. Эти данные относятся к экваториальному поясу Венеры, ограниченному широтами $\pm 10^\circ$ в интервале долгот 280—360°. Еще больший диапазон изменений пара-

метра С был получен при обработке отраженных сигналов радиолокационной системы, установленной на космических аппаратах "Венера-15 и -16" (см. разд. 6.4).

Форма диаграммы обратного рассеяния определяется структурой поверхности планеты. Чем ровнее поверхность, тем большая часть энергии отражается вблизи зеркальных углов и тем уже диаграмма обратного рассеяния. Предполагая зеркальный характер отражения радиоволн, диаграмму обратного рассеяния можно использовать для оценки распределения углов наклона поверхности. Можно показать,

Таблица 6.1. Значения параметров a и b для поверхности Венеры, Марса и Луны

Планета	a , угл. град·см ^{<i>b</i>}	b
Венера	5,4	0,19
Марс	3,3	0,31
Луна	11,5	0,23

что распределение углов наклона поверхности в пространстве имеет характерный максимум, причем наивероятное значение углов наклона φ_m , соответствующее положению максимума, равно

$$\varphi_m \approx \arcsin(1/\sqrt{2C}), \quad C \gg 1. \quad (6.7)$$

При $C = 240$ на волне 39 см $\varphi_m = 2,6^\circ$.

На данной волне интенсивное отражение в направлении источника могут дать элементы поверхности, размеры и радиусы кривизны которых много больше длины волны. Поэтому спектральная зависимость φ_m может характеризовать распределение неровностей по размерам. Изменение наивероятного значения углов наклона поверхности Венеры, а также Марса и Луны в зависимости от длины волны показано на рис. 6.4 (правая шкала). Спектральную зависимость можно аппроксимировать степенной функцией

$$\varphi_m = a\lambda^{-b}. \quad (6.8)$$

Значения коэффициента a и показателя степени b для поверхности Венеры, Марса и Луны, найденные по экспериментальным точкам методом наименьших квадратов, приведены в табл. 6.1. Соответствующие зависимости представлены на рис. 6.4 прямыми. Поверхность Венеры выглядит более гладкой по сравнению с Луной и более шероховатой по сравнению с Марсом.

Диффузная составляющая. При больших углах падения характер отражения радиоволн поверхностью Луны и планет меняется и начинает преобладать рассеяние радиоволн на элементах поверхности, размер которых соизмерим с длиной волны, имеющее диффузный характер [18, 26]. Диаграмму обратного рассеяния в этом случае можно представить зависимостью

$$P_d(\varphi) = \cos^g \varphi. \quad (6.9)$$

Параметр ($\vartheta = 1$) в поверхностной фотометрии планет носит название фактора гладкости [28]. Эта зависимость довольно хорошо представляет в оптике обратное рассеяние для многих типов встречающихся шероховатых поверхностей. Так, например, для ортотропного рассеяния, которое описывается законом Ламберта, $\vartheta = 2$, а для рассеяния, при котором яркость поверхности не зависит от угла φ , $\vartheta = 1$. Последний тип рассеяния можно наблюдать на Луне в полнолуние, когда яркость любой детали лунного диска определяется только отражательной способностью вещества в данном месте [29].

Для исследования диффузной составляющей диаграммы обратного рассеяния Венеры было использовано распределение $P(\nu)$ (см. рис. 6.3). Доплеровский спектр отраженного сигнала прослеживается почти до самых границ, соответствующих точкам с максимальной разницей радиальных составляющих скорости (точки B_1 , B_2). Расчетные значения границ спектра отмечены на рис. 6.3 вертикальными стрелками. Анализ крыльев этого спектра показал, что их форма соответствует ламбертовскому рассеянию ($\vartheta = 2$) [22]. Зеркальная составляющая начинает проявляться при углах φ , меньших 45° .

Удельная эффективная площадь обратного рассеяния поверхности Венеры. Удельная эффективная площадь обратного рассеяния поверхности планеты характеризует изменение эффективной площади обратного рассеяния участка поверхности единичной геометрической площади в зависимости от угла падения. По сравнению с диаграммой обратного рассеяния $P(\varphi)$ удельная эффективная площадь обратного рассеяния поверхности $\sigma(\varphi)$ является более полной характеристикой отражательной способности планеты в направлении источника и связана с ней соотношением

$$\sigma(\varphi) = \sigma_0 P(\varphi), \quad (6.10)$$

где σ_0 — значение $\sigma(\varphi)$ в случае, когда волна падает по нормали к средней поверхности исследуемого участка.

Удельную эффективную площадь обратного рассеяния поверхности можно найти через эффективную площадь обратного рассеяния планеты ρ (см. примеч. 1):

$$\sigma_0 = \rho \left(2 \int_0^{\pi/2} P(\varphi) \sin \varphi d\varphi \right)^{-1} \quad (6.11)$$

(см., например, [23]). Здесь ρ выражено в долях от площади поперечного сечения планеты πa^2 .

Учитывая различный характер зеркальной и диффузной составляющих, удельную эффективную площадь обратного рассеяния поверхности можно представить в виде суммы:

$$\sigma(\varphi) = \sigma_{0s} P_s(\varphi) + \sigma_{0d} P_d(\varphi), \quad (6.12)$$

$$\sigma_{0s} \approx \frac{1}{2} \rho_s C \text{ при } C \gg 1,$$

$$\sigma_{0d} = \frac{1}{2} \rho_d (\vartheta + 1).$$

Здесь ρ_s , ρ_d — зеркальная и диффузная составляющие эффективной площади обратного рассеяния планеты, отнесенные к площади ее поперечного сечения.

Взяв найденные из наблюдений Венеры на волне 39 см значения

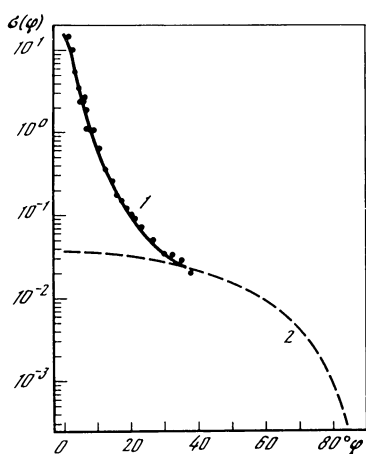


Рис. 6.5. Удельная эффективная площадь обратного рассеяния поверхности Венеры на волне 39 см для зеркального (1) и диффузного (2) отражений

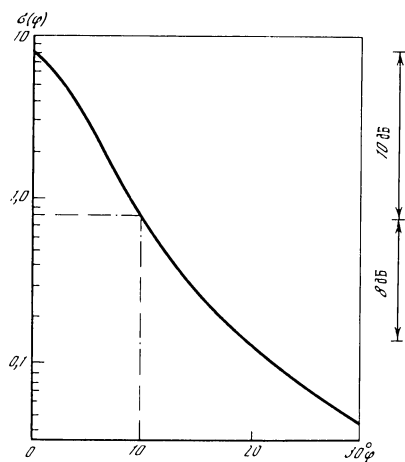


Рис. 6.6. Удельная эффективная площадь обратного рассеяния поверхности Венеры для волны 8 см (по данным, полученным ранее при радиолокации с Земли)

Изменение угла φ в пределах $\pm 10^\circ$ относительно среднего значения (10°), на что был рассчитан эксперимент, выполнявшийся с космических аппаратов "Венера-15 и -16", приводит к изменению мощности отраженных сигналов на 18 дБ

параметров $\rho_s = 0,136$, $\rho_d = 0,024$ [30] при $C = 240$ и $\vartheta = 2$, будем иметь

$$\sigma_s(\varphi) = 16,4(1 + 240 \sin^2 \varphi)^{-1/2},$$

$$\sigma_d(\varphi) = 0,036 \cos^2 \varphi. \quad (6.13)$$

Формулы предполагают, что передающая и приемная антенны имеют взаимнообратную круговую или согласованную линейную поляризацию. В верхней формуле для простоты $\cos^4 \varphi$ заменен на 1, что не приводит к большим ошибкам, если C велико.

Обе зависимости изображены на рис. 6.5 вместе с экспериментальными точками. При нормальном падении эффективная площадь обратного рассеяния поверхности Венеры в 15—20 раз больше геометрической. Уровень диффузной составляющей при нормальном падении на 27 дБ меньше, чем зеркальной. Изменение характера отражения происходит при $\varphi = 30 \div 40^\circ$.

Крутизной диаграммы обратного рассеяния определялась контрастность радиолокационных изображений при съемке поверхности Венеры с космических аппаратов "Венера-15 и -16". Угол падения радиоволн, определяемый ориентацией электрической оси антенны радиолокационной станции бокового обзора, составлял в среднем 10° . Как следует из рис. 6.6, на котором изображена зависимость $\sigma(\varphi)$, пересчитанная к рабочей волне 8 см, при отклонении падающего луча от вертикали на 10° мощность отраженных сигналов уменьшается на 10 дБ (в 10 раз). Эта величина определяет среднее значение яркости изображения, относительно которого выделяются детали изображаемой поверхности. При этом некоторые элементы поверхности, такие, как склоны горных хреб-

тов, кратеров и долин, обращенные к космическому аппарату, могут иметь более удачное положение по отношению к падающему лучу. Мощность отраженных сигналов для них будет иметь превышение над средним значением до 10 дБ. Другие элементы оказываются ориентированными к падающему лучу менее удачно: для них значение угла φ больше 10° и мощность отраженных сигналов ниже среднего значения на 8 дБ (в 6,3 раза) при $\varphi = 20^\circ$. Следовательно, контрасты между отдельными элементами поверхности могут достигать 18 дБ (разница в 63 раза), подчеркивая форму геологических структур.

Высокая контрастность изображения и большая мощность отраженных сигналов получаются только при приеме на антенну, поляризация которой согласована с поляризацией отраженных волн. При приеме деполяризованной составляющей мощность отраженных сигналов упала бы на 15—20 дБ (сравните кривые 2 и 1 на рис. 6.5). Ввиду отсутствия у Венеры заметного магнитного поля можно было использовать при передаче и приеме линейную поляризацию антенн, не опасаясь возникновения поляризационных помех при прохождении радиоволн через ее ионосферу.

6.2. ХАРАКТЕРИСТИКИ АТМОСФЕРЫ ВЕНЕРЫ В РАДИОДИАПАЗОНЕ

Спектральная зависимость эффективной площади обратного рассеяния Венеры. Первые радиолокационные наблюдения Венеры, осуществленные на волнах дециметрового и метрового диапазонов, показывали примерно одинаковое значение эффективной площади обратного рассеяния Венеры — около 0,15 от площади поперечного сечения планеты. Результаты наблюдений собственного радиоизлучения Венеры давали основание предполагать, что заметное поглощение в атмосфере планеты может иметь место только на волнах короче 1,5—2 см [31]. Поэтому неожиданным оказалось уменьшение эффективной площади обратного рассеяния Венеры в 10—15 раз по сравнению с дециметровым диапазоном, обнаруженное в Линкольновской лаборатории Массачусеттского технологического института во время радиолокационных наблюдений на волнах 3,6 и 3,8 см [32, 33].

Результаты измерения эффективной площади обратного рассеяния Венеры при взаимобратной поляризации передающей и приемной антенн в диапазоне волн 3,6—784 см представлены на рис. 6.7.

Хотя на некоторых волнах измерения проводились неоднократно, нами были взяты те из них, где чувствительность радиолокационной установки была выше и где, на наш взгляд, не завышена оценка точности измерений. Предпочтение отдавалось измерениям, охватывающим больший интервал времени. Продолжительность некоторых измерений позволила получить среднее значение ρ для всех (или большей части) долгот центрального меридиана, несмотря на медленное вращение Венеры.

Хотя уменьшение эффективной площади обратного рассеяния Венеры происходит очень резко, характеристики отражения остаются примерно такими же, как и на более длинных волнах. Спектральные

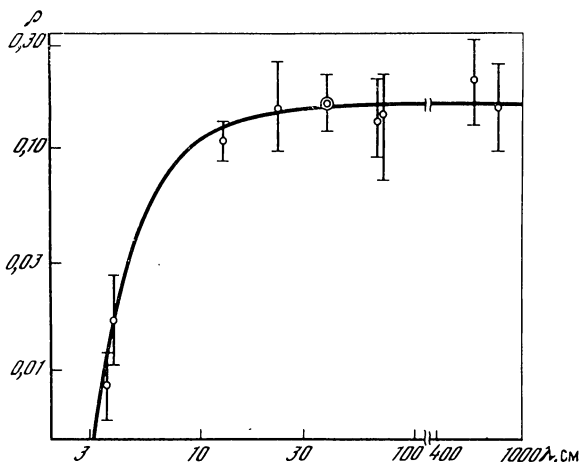


Рис. 6.7. Спектральная зависимость эффективной площади обратного рассеяния Венеры (ρ выражено в долях поперечного сечения планеты)

детали, обусловленные областями поверхности с повышенной отражательной способностью, обнаруженные на дециметровых волнах, наблюдаются также и на волне 3,8 см [11, 34]. Следовательно, уменьшение отражательной способности вызвано наличием поглощения на пути электромагнитного излучения.

Вследствие кривизны поверхности планеты и увеличения длины пути излучения в поглощающем слое при косом падении радиолуча должно иметь место постепенное потемнение диска планеты к лимбу. Такое потемнение в действительности замечено в наблюдениях на волне 3,8 см [33, 11], однако определенное отсюда значение поглощения при двукратном прохождении атмосферы по вертикали получилось равным 4—6 дБ, что значительно меньше, чем следует из уменьшения эффективной площади обратного рассеяния [33].

Потемнение диска планеты к лимбу, связанное с увеличением пути луча в поглощающем слое, должно приводить к более сильному ослаблению крыльев спектра отраженного сигнала по сравнению с его центральной частью. Путем непосредственного сравнения крыльев спектра на волне 3,8 см с моделями, рассчитанными для нескольких значений поглощения, предполагая, что диффузная составляющая спектра в отсутствие поглощения описывается выражением (6.9), Ю.Н. Александров получил величину поглощения 7—9 дБ при показателе степени $\vartheta = 2$ и 8,5—10 дБ при $\vartheta = 1,5$ [34]. Первоначальное расхождение [33] возникло, по-видимому, из-за недостатка в методике обращения частотного спектра в диаграмму обратного рассеяния, когда предварительно приходится сглаживать экспериментальные точки.

Поглощение радиоволн в газовых составляющих венерианской атмосферы. Причиной уменьшения отражательной способности Венеры на волнах сантиметрового диапазона является, как теперь установлено, нерезонансное поглощение электромагнитного излучения в газовых

составляющих ее атмосферы, а именно в углекислом газе и парах воды, присутствие которых было обнаружено приборами спускаемого аппарата автоматической межпланетной станции "Венера-4" [35]. В этом случае оптическая толщина атмосферы при вертикальном прохождении луча изменяется обратно пропорционально квадрату длины волны:

$$\tau_0 = \tau_0(\lambda) = \lambda_0^2 / \lambda^2, \quad (6.14)$$

где λ_0 — длина волны, на которой оптическая толщина становится равной 1.

Считая атмосферу плоскостистой⁵, наблюдаемое при радиолокации на различных волнах изменение эффективной площади обратного рассеяния можно представить с помощью модифицированного закона Бугера

$$\rho = \rho(\lambda) = \rho_0 e^{-2\tau_0(\lambda)}, \quad (6.15)$$

где ρ_0 — отражательная способность планеты в отсутствие атмосферного поглощения. Предполагается, что ρ_0 не зависит от длины волны.

На рис. 6.7 сплошной линией представлена зависимость (6.15), значения параметров которой были найдены по экспериментальным точкам методом наименьших квадратов. При этом получилось: $\rho_0 = 0,155$, $\lambda_0^2 = 17,4 \text{ см}^2$ [23]. Всем измерениям были приписаны равные веса ввиду того, что относительная точность измерений имеет примерно одинаковую величину.

На точность определения поглощения оказывают влияние в основном измерения на волне 3 см. Среднеквадратичная ошибка этих измерений составляет примерно 1 дБ (1,26 раза), что в пересчете к λ_0^2 приводит к ошибке $\pm 1,8 \text{ см}^2$.

Фактически полученное значение λ_0^2 немного завышено за счет того, что атмосфера предполагалась плоскостистой. Можно показать [23], что увеличение пути отраженного луча в атмосфере к лимбу из-за кривизны поверхности приводит к уменьшению отражательной способности планеты, эквивалентному увеличению оптической толщины атмосферы на волне 3,8 см примерно на 7%. С учетом этого $\lambda_0^2 = 16,2 \pm 1,7 \text{ см}^2$.

Значения оптической толщины атмосферы τ_0 и ослабления сигнала при двухкратном прохождении атмосферы по вертикали η_0 ($\eta_0 = e^{-2\tau_0}$), рассчитанные для ряда длин волн при $\lambda_0^2 = 16,2 \text{ см}^2$, приведены ниже:

λ , см	1,35	3,6	3,8	8,0	12,5	23	39
τ_0	8,9	1,25	1,12	0,253	0,104	0,031	0,011
η_0 , дБ	77	10,9	9,7	2,2	0,90	0,27	0,09

Оптическая толщина венерианской атмосферы резко падает с увеличением длины волны. На волне 23 см отраженный сигнал ослабляется всего на 6%. На более длинных волнах атмосферным поглощением можно вообще пренебречь.

⁵ Хотя из-за кривизны поверхности планеты оптическая толщина слоя должна увеличиваться к лимбу, вызывая потемнение; в первом приближении этим можно пренебречь, поскольку основное отражение дает зеркальный блик в центре планетного диска.

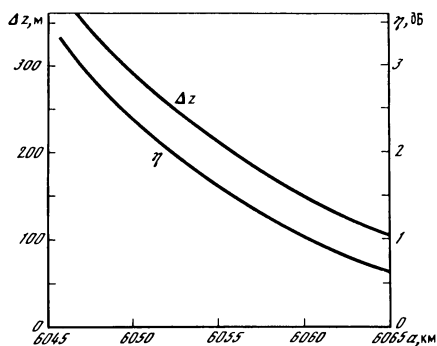


Рис. 6.8. Ослабление отраженных сигналов η для волны 8 см и увеличение измеренного расстояния Δz за счет атмосферы Венеры в зависимости от местного радиуса

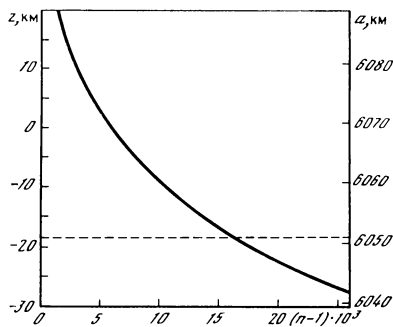


Рис. 6.9. Изменение коэффициента преломления газа в атмосфере Венеры от высоты

Штриховая линия — положения поверхности по измерениям межпланетных станций "Венера-7 и -8"

Поглощение венерианской атмосферы имело решающее значение при выборе рабочей волны радиолокационной системы космических аппаратов "Венера-15 и -16". При ограниченной длине синтезированной апертуры, определяемой возможностью непрерывно запоминать отраженные сигналы на борту аппарата, пространственное разрешение вдоль пути тем выше, чем короче волна.

С другой стороны, на волнах короче 10—20 см резко падает мощность отраженных сигналов вследствие атмосферного поглощения.

На волне 8 см, которая была выбрана для радиолокационной системы космических аппаратов "Венера-15 и -16", поглощение при вертикальном прохождении атмосферы составляет 2,2 дБ (см. выше), что было учтено при расчете энергетического потенциала системы. Для сигналов радиолокационной станции с синтезированной апертурой, которые излучаются под углом 10° относительно вертикали, поглощение возрастает на 1,5%.

Глубина лежащей выше атмосферы зависит от высоты местного рельефа. По этой причине над низменными районами поглощение больше средней величины, а над возвышенными — меньше. Изменение поглощения отраженных сигналов для волны 8 см, на которой работала радиолокационная система космических аппаратов "Венера-15 и -16", в зависимости от местного радиуса планеты показано на рис. 6.8. При вычислении поглощения параметры атмосферы задавались моделью, описанной ниже. По данным рис. 6.8 корректировалась мощность отраженных сигналов при вычислении коэффициента отражения поверхности Венеры.

Рефракция радиоволн в атмосфере Венеры. В оптическом диапазоне волн рефракционные явления в атмосфере Венеры определяются, по-видимому, распределением плотности углекислого газа, из которого почти целиком состоит атмосфера Венеры [35, 36]. В радиодиапазоне, помимо углекислого газа, надо учитывать также влияние во-

Таблица 6.2. Распределение параметров газа в атмосфере Венеры

z, км	T, К	ρ , атм	q , кг/м ³	Температурный градиент, К/км	Показатель по- литропы
Измерения [38]					
37	291	0,56	0,96	7,0	1,19
34	312	0,86	1,38	7,3	1,22
31	334	1,26	1,88	7,0	1,26
28	355	1,70	2,39	7,7	1,20
25	378	2,50	3,30	8,3	1,23
22	403	3,50	4,34	9,7	1,29
19	432	4,8	5,15	9,7	1,26
16	461	6,6	7,15	9,3	1,26
13	489	8,8	9,0	8,7	1,24
10	515	11,5	11,15	8,3	1,21
7	540	15,2	14,05	8,3	1,24
4	565	19,2	17,0	7,8	1,21
0	596	26,0	21,8	8,44	1,218
Модель [23]					
-3,2	623	33,3	28,8	8,31	1,215
-9,2	673	51,6	41,2	8,12	1,211
-15,4	723	77,8	57,5	7,98	1,207
-21,6	773	115	78,7	7,78	1,203
-28,0	823	167	106		

дяного пара — второго отождествленного компонента венерианской атмосферы. Благодаря большому постоянному дипольному моменту молекулы воды могут дать существенный вклад, несмотря на невысокое относительное содержание в атмосфере.

Прецизионные измерения коэффициента преломления углекислого газа [37] дают при нормальных условиях ($t = 0$, $p = 1$ атм)

$$(n_n - 1) \cdot 10^6 = 495,16 \pm 0,08.$$

Значения коэффициента преломления при нормальных условиях легко пересчитать к состоянию газа в условиях венерианской атмосферы через плотность газа:

$$n - 1 = (n_n - 1)q/q_n, \quad (6.16)$$

где q_n — плотность газа в нормальных условиях ($q_n = 1,977$ кг/м³).

Изменение коэффициента преломления газа в атмосфере Венеры от высоты представлено на рис. 6.9. Параметры, определяющие состояние газа выше уровня атмосферы с температурой 596 К и давлением 26,0 атм (где окончились измерения автоматических межпланетных станций "Венера-5 и -6", не достигших поверхности), были взяты в соответствии с результатами прямых измерений станций "Венера-4, -5 и -6"; ниже этого уровня — в соответствии с построенной нами моделью адиабатической, чисто углекислотной атмосферы, при расчете которой учитывалось реальное состояние газа и изменение ускорения свободного падения от высоты (табл. 6.2). Условный уровень

Таблица 6.3. Коэффициент преломления газа у поверхности Венеры и запаздывание радиоволн в ее атмосфере

АМС	T_0 , К	p_0 , атм	q_0 , кг/м ³	z_0 , км	$(n_0 - 1) \cdot 10^3$	Δz , м	$2\Delta z/c$, мкс
"Венера-7"	747±20	94±15	68±8	-18,3±2,5	17±2	260±40	1,7±0,3
"Венера-8"	741±7	93±1,5	66±1	-18,1±0,5	16,5±0,3	257±4	1,71±0,03

$z = 0$ соответствует положению станций "Венера-5 и -6" в момент окончания измерений. Высота отсчитывается от этого уровня по вертикали.

В табл. 6.3 приведены значения температуры T_0 и давления p_0 , измеренные станциями "Венера-7 и -8" в момент посадки [39, 40], а также вычисленное по этим данным положение поверхности Венеры z_0 относительно уровня атмосферы, соответствующего окончанию измерений станциями "Венера-5 и -6", и коэффициент преломления газа у поверхности n_0 .

Станции "Венера-7 и -8" опустились в приэкваториальном районе, в котором радиус поверхности близок к среднему радиусу планеты. Поэтому можно считать, что приведенные данные относятся к средней поверхности Венеры. Теплоемкость венерианской атмосферы настолько велика, что в ее нижней части практически полностью сглаживаются температурные различия, связанные со сменой дня и ночи (см. например, [41]).

Водяной пар существенно влияет на распределение коэффициента преломления, по-видимому, лишь на высотах в несколько десятков километров. Газоанализаторы станций "Венера" показали абсолютное содержание воды около 11 мг/л при давлении 0,6 атм и около 6 мг/л при давлении 2 атм [36]. Это соответствует парциальному давлению водяного пара e 15 и 10 мбар.

Поправка на водяной пар учитывается формулой [42] (в единицах 10^{-6})

$$72e/T + 3,75 \cdot 10^5 e/T^2.$$

На высоте 55 км, соответствующей давлению 0,6 атм ($z \approx 37$ км), приращение коэффициента преломления за счет водяного пара составляет $70 \cdot 10^{-6}$, что увеличивает $(n - 1)$ на этой высоте почти на 30%. Но уже на высоте 45 км, соответствующей давлению 2 атм ($z \approx 27$ км), приращение коэффициента преломления уменьшается до $30 \cdot 10^{-6}$, что что составляет не более 5% от $(n - 1)$.

Вследствие рефракции траектория радиолуча радиолокационной станции с синтезированной апертурой при съемке Венеры с космических аппаратов "Венера-15 и -16" несколько искривляется в атмосфере и приближается к вертикали. Это вызывает смещение точки, в которой происходит отражение, по поверхности планеты. Однако из-за небольшой величины угла, составляемого радиолучом с вертикалью, это смещение не превышает 100 м.

Запаздывание радиоволн в атмосфере Венеры. Наличие плотной атмосферы должно приводить к значительному увеличению времени распространения волн при радиолокации Венеры. Это увеличение опре-

деляется разностью Δz оптической и фактической длин пути в атмосфере.

Оптическая длина пути при вертикальном распространении луча между поверхностью планеты ($z = z_0$) и уровнем z определяется так:

$$\int_{z_0}^z n dz = (z - z_0) + \int_{z_0}^z (n - 1) dz,$$

где $n = n(z)$ — показатель преломления атмосферы. (Здесь первое слагаемое дает фактическую длину пути.) Разность оптической и фактической длин пути для луча, падающего на поверхность или выходящего с поверхности в свободное пространство, определяется вторым слагаемым, если $z \rightarrow \infty$:

$$\Delta z = \int_{z_0}^{\infty} (n - 1) dz. \quad (6.17)$$

Выразив коэффициент преломления через его значение при нормальных условиях (6.16) и через плотность газа, будем иметь

$$\Delta z = \left[(n_n - 1) / q_n \right] \int_{z_0}^{\infty} q dz = \left[(n_n - 1) / g q_n \right] \int_{z_0}^{\infty} g q dz,$$

где $g = \text{const}$.

Из уравнения гидростатического равновесия $g q dz = -dp$. Следовательно, выполнив подстановку, получим

$$\Delta z = (n_n - 1) p_0 / g q_n, \quad (6.18)$$

т.е. превышение оптической длины пути над фактической целиком определяется давлением у поверхности (p_0) и не зависит от модели атмосферы.

Запаздывание радиоволн в атмосфере Венеры, вычисленное по данным измерений автоматических межпланетных станций (см. предыдущий пункт), приведено в последнем столбце табл. 6.3.

Величина Δz представляет поправку, которую надо вычесть из измеренного при радиолокации расстояния. Над средней поверхностью планеты она составляет около 260 м. При вертикальном прохождении волн через атмосферу увеличение времени распространения отраженных сигналов ($2\Delta z/c$) составляет 1,7 мкс. Дополнительное запаздывание изменяется в соответствии с толщиной атмосферы над данной точкой поверхности (см. рис. 6.8), что учитывалось при обработке измерений высотного рельефа с космических аппаратов "Венера-15 и-16".

6.3. ИССЛЕДОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ВЕНЕРЫ И МАРСА С ЗЕМЛИ

Измерения высотного рельефа поверхности. Разность между непосредственно измеренным расстоянием от антенны радиолокатора до ближайшего участка поверхности планеты (точка O на рис. 6.1) и расстоянием до центра масс планеты (точка O'), положение которого уточняется в процессе измерений, дает расстояние от центра масс планеты той области ее поверхности, которая в данный момент проходит через центр видимого диска. По сумме измерений можно найти высоту этой области относительно некоторой средней сферической поверхности. Этот метод был развит в работе [13] для одновремен-

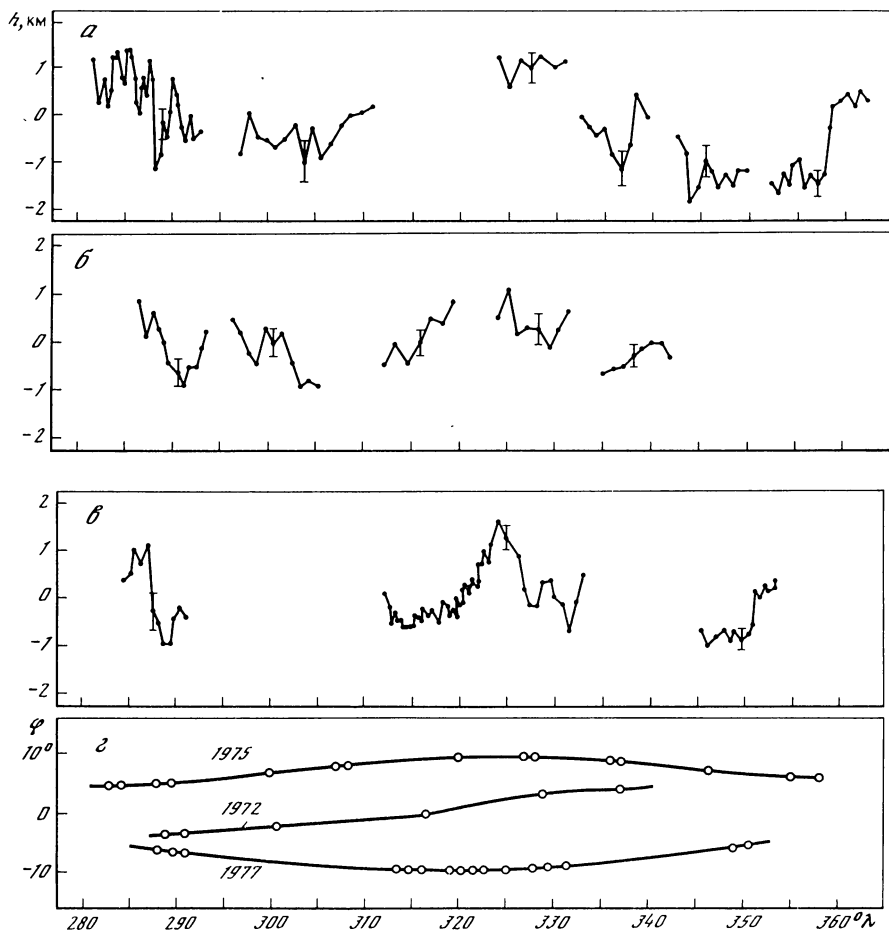


Рис. 6.10. Профили высот поверхности Венеры по наблюдениям в Крыму в 1975 (а), 1972 (б) и 1977 (в) и трассы, вдоль которых проводились измерения (г)

Вертикальными отрезками показано среднеквадратичное значение ошибок измерений

ного измерения расстояния до различных точек видимого экватора планеты, что основано на разделении отраженных сигналов по запаздыванию и доплеровскому смещению частоты. Сравнение измеренных расстояний со значениями, вычисленными для сферической модели планеты, позволяет получить более детальный профиль высот поверхности.

Профили высот поверхности Венеры, полученные из наблюдений 1972, 1975 и 1977 гг. на волне 39 см [13], приведены на рис. 6.10, а—в в порядке их меридионального расположения. На рис. 6.10, г показаны трассы движения центра видимого диска планеты, вдоль которых измерялся профиль. Широта φ и долгота λ приведены в афродитографической системе координат, принятой Международным астрономиче-

ским союзом (МАС) в 1970 г. Радиус планеты принят равным 6050 км. Смещение трасс в меридиональном направлении обусловлено только несовпадением плоскостей орбит Венеры и Земли, поскольку ось вращения Венеры практически перпендикулярна ее орбите. Величина линейного разрешения поверхности вдоль трасс составляла 40—200 км в зависимости от условий наблюдения, среднеквадратичная ошибка измерения высоты 150—500 м.

Как видно из рисунка, изрезанность профилей высот различна, перепады высот достигают 2 км. Наибольшую изрезанность имеют профили высот в интервале долгот 280—293° на широте 5°. В этой области перепады высот 1—2 км наблюдаются на сравнительно малой базе, что свидетельствует о сложном рельефе поверхности.

Вблизи долготы 325° на широте —9° выделяется возвышенность высотой 2 км при протяженности основания около 1000 км. Ее правый склон более изрезан, чем левый.

Профиль высот в интервале долгот 340—360° на широте 6°, полученный в 1975 г., напоминает сечение котловины диаметром не менее 1500 км. Ее правый склон высотой в 1,5 км на долготе 358° может иметь продолжение на рис. 6.10, в на долготе 351°; здесь его высота около 1 км.

Дно котловины более гладкое, чем окружающая местность. Внутри котловины величина параметра C достигает 450—550, в то время как вне ее она опускается до 200—300. Правый край котловины сложен более плотными породами, чем ее дно. Вблизи долготы 358° отражательная способность возрастает в 1,5 раза, чему соответствует увеличение относительной диэлектрической проницаемости от 4,2 до 6,6 [13].

Обращает на себя внимание повторяемость профилей отдельных областей, удаленных одна от другой по широте на 1000 км и больше, что может указывать на меридионально ориентированные протяженные структуры. Впадина глубиной 2 км и шириной 200—300 км на долготе 288° присутствует на всех трассах, отстоящих одна от другой на 1500 км.

В 1980 г. наблюдениями была охвачена новая область в интервале долгот 70—230° на широте $-1 \div -3,7^\circ$ [14], где обнаружены две обширные горные области (рис. 6.11). Первая из них на долготе 90° имеет высоту около 4 км, вторая — 3 км на долготе 195°. Между ними расположена холмистая равнина протяженностью около 8000 км.

Полученные данные интересно сопоставить с результатами картографирования поверхности Венеры, выполненного с помощью радиовысотомера, установленного на орбитальном аппарате АМС "Пионер—Венера" [43]. Величина линейного разрешения поверхности радиовысотомера была не хуже 150 км, точность измерения высоты не хуже 200 м. Это сравнимо с точностью описанных наземных измерений профиля высот Венеры.

Изрезанный рельеф в интервале долгот 280—293° на широте 5° (см. рис. 6.10, а) соответствует южной оконечности Области Бета. Протяженная меридионально ориентированная впадина вблизи долготы 290° — Разлом Деваны. Впадина глубиной не менее 1 км на долготе

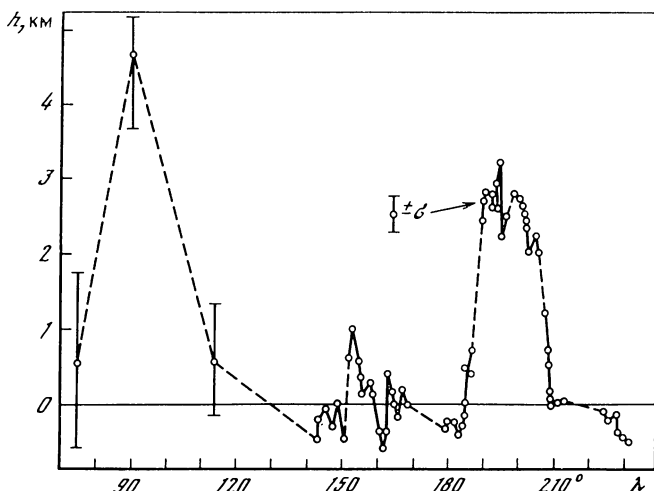


Рис. 6.11. Профиль высот поверхности Венеры по наблюдениям 1980 г. в Крыму

Широта трассы изменялась от -1° до $-3,7^\circ$ в системе координат, принятой МАС в 1976 г.

337° и широте 8° (см. рис. 6.10,а) видна на контурной карте высот (см. рис. 2 из работы [43]).

Профиль, изображенный на рис. 6.11, соответствует приэкваториальному сечению области Земля Афродиты, состоящей из трех горных массивов. На рисунке виден профиль двух из них — западного и восточного. Средний массив оказался пропущен, ввиду того что в интервале долгот $110-140^\circ$ не было измерений.

Котловина в интервале долгот $340-360^\circ$ на широте 6° и возвышенность с координатами 325° , -9° слегка намечаются на контурной карте высот [43]. Очертания котловины просматриваются на изображениях, полученных при радиолокации с Земли. Северный край котловины виден на одном из изображений, полученных в Аресибо (Разлом Шурали, см. рис. 8-f из работы [43], рис. 2 из [44]), а юго-восточный — на изображении, полученном в Голдстоуне (см. рис. 8 из работы [45])⁶. Часть указанной котловины просматривается и на полутоновой карте высот, полученной в Голдстоуне (рис. 16 из работы [45]).

На изображении поверхности и полутоновой карте высот, полученной в Голдстоуне, на долготе 325° и широте -10° наблюдается яркая деталь, возвышающаяся над окружающей местностью (см. рис. 6 и 14 из работы [45]), но размеры ее много меньше, чем на рис. 6.10,в. При картографировании в Аресибо данные в этой области не могли быть разделены однозначно.

В 1980 г. исследовался также высотный рельеф Марса [14]. Вид профиля высот его поверхности вдоль параллели 21° с.ш. приведен

⁶ При сравнении надо учитывать, что система афродитографических координат, принятая в Голдстоуне, сдвинута по долготе относительно системы координат МАС к востоку на $4,3^\circ$ [46].

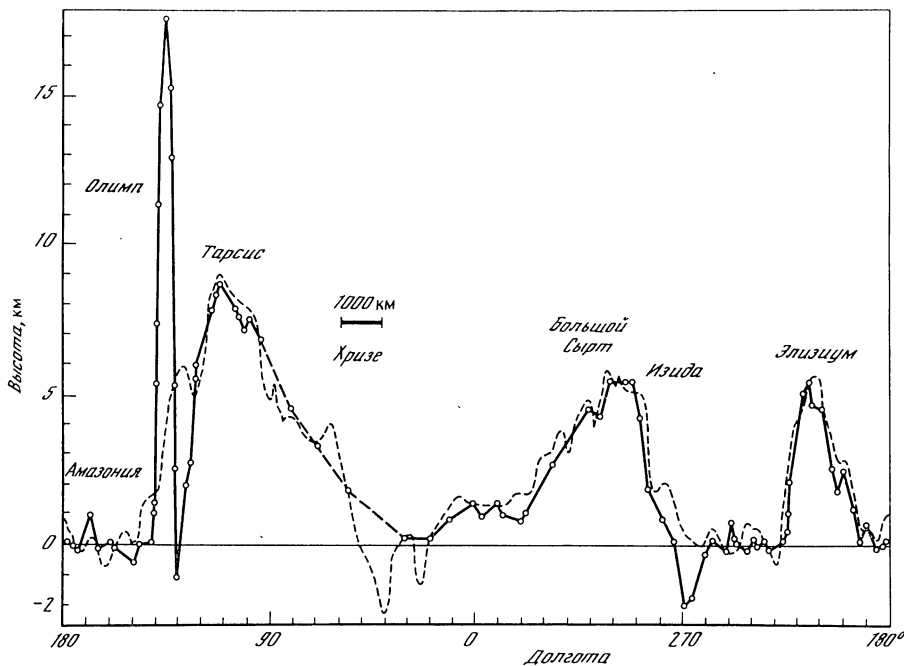


Рис. 6.12. Профиль высот поверхности Марса вдоль параллели 21° с.ш. по наблюдениям 1980 г. в Крыму

Достигнутое разрешение (3° по широте и до 1,5° по долготе) позволило измерить высотный рельеф некоторых деталей поверхности Марса, которые не были выявлены при наблюдении в Хайстеке на волне 3,8 см в 1967 г. [47] (штриховая линия). Нулевому уровню соответствует сфера радиуса 3394 км

на рис. 6.12. Привязка полученного профиля была осуществлена с помощью топографической карты Марса, составленной на основе телевизионной съемки с космического аппарата "Маринер-9". Наиболее примечателен участок профиля, относящийся к долготе 130—140°. Здесь трасса измерений прошла по склону потухшего вулкана Олимп и зафиксирована высота $17,6 \pm 1,5$ км. Средняя крутизна склонов 3,6°. По данным съемки "Маринера-9", вершина вулкана достигает высоты 27 км.

Для сравнения на рисунке приведен также профиль высот, полученный ранее в Хайстеке на волне 3,8 см [47]. Хотя измерения велись практически по той же трассе, Олимп не был зафиксирован на этом профиле, так же как сравнительно глубокая впадина справа от него и более протяженная впадина глубиной 2 км с долготой 270°. Эти впадины отсутствуют и на указанной выше топографической карте Марса.

Плотность поверхностных пород Венеры. Плотность пород, составляющих поверхность Венеры, можно оценить по величине относительной диэлектрической проницаемости, если поверхность планеты, как и земная кора, сложена в основном силикатами.

Величина относительной диэлектрической проницаемости ϵ по радиолокационным наблюдениям Венеры на волне 39 см для разных областей лежит в пределах от 2,7 до 6,6 [13]. На Земле значение диэлектрической проницаемости, соответствующее верхнему пределу, имеют обычные скальные породы на силикатной основе. Их плотность $2,5—3 \text{ г/см}^3$ [48, 49].

Значительно более низкая величина ϵ в других областях является, очевидно, следствием пористости вещества, покрывающего эти области.

Для земных силикатов в сухом состоянии экспериментально установлено, что параметр $(\sqrt{\epsilon} - 1)/q$ практически не зависит от плотности пористой породы q и равен примерно $0,5 \text{ см}^3/\text{г}$ [49]. Используя это соотношение, получим, что верхний слой с низким значением ϵ должен иметь плотность около $1,3 \text{ г/см}^3$.

Отраженная волна формируется в сравнительно толстом слое диэлектрика, что позволяет оценить толщину покрова с низким значением ϵ . Толщина слоя, формирующего отраженное излучение, в 2 раза меньше глубины проникновения электромагнитной волны:

$$l = \lambda / 2\pi \sqrt{\epsilon} \operatorname{tg} \Delta, \quad (6.19)$$

где $\operatorname{tg} \Delta$ — тангенс угла потерь вещества.

Величина $\operatorname{tg} \Delta$ силикатов в сухом состоянии имеет порядок 10^{-2} [48]. Взяв $\operatorname{tg} \Delta = 0,01$ для $\epsilon = 2,7$ при $\lambda = 39 \text{ см}$, получим $l = 3,8 \text{ м}$. Следовательно, глубина пористого покрова Венеры в областях с низким значением относительной диэлектрической проницаемости может превышать 2 м.

Заметим, что средняя величина относительной диэлектрической проницаемости поверхностного слоя Луны меньше, чем Венеры (2,8 и 4,5). Следовательно, относительная доля поверхности, занятая пористым материалом, на Луне значительно больше, чем на Венере (по крайней мере в той части их поверхности, которая охвачена радиолокационными наблюдениями).

Интересно сравнить эти данные с результатами измерений, проведенными АМС. В 1972 г. с помощью радиовысотомера (длина волны 35 см), установленного на спускаемом аппарате АМС "Венера-8", была измерена плотность поверхностных пород в районе посадки спускаемого аппарата (долгота 325° , широта -9°), которая оказалась равной $1,4 \pm 0,55 \text{ г/см}^3$ [50]. В 1975 г. плотность поверхностных пород была непосредственно измерена радиационным плотномером на спускаемом аппарате автоматической межпланетной станции "Венера-10" (долгота 291° , широта 16°). Плотность выходов скальных образований, видимых на переданной станцией фототелевизионной панораме поверхности Венеры, получилась равной $2,8 \pm 0,1 \text{ г/см}^3$ [51]. Это согласуется с выводом о базальтовом составе коры, независимо полученном при измерении химического состава поверхности. Видно, что измеренные значения плотности совпадают с крайними оценками, сделанными на основе наземных радиолокационных наблюдений для различных областей поверхности Венеры.

6.4. РАДИОЛОКАЦИОННАЯ СЪЕМКА ПОВЕРХНОСТИ ВЕНЕРЫ С КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ "ВЕНЕРА-15 И -16"

Принципы радиолокационной съемки. Космические аппараты "Венера-15 и -16" были оборудованы радиолокационной системой 8-сантиметрового диапазона волн, состоящей из радиолокационной станции бокового обзора для получения изображений поверхности планеты и радиовысотомера для измерения высотного рельефа и локальных характеристик отражения поверхности [16]. Для получения необходимого пространственного разрешения 1—2 км при высоте полета 1000—2000 км применен синтез апертуры, который для исследования Венеры с космического аппарата использовался впервые.

Во время радиолокационной съемки с помощью системы астроориентации космического аппарата электрическая ось антенны радиовысотомера направлена вдоль местной вертикали к центру планеты. Электрическая ось антенны радиолокационной станции с синтезированной апертурой отклонена от местной вертикали на угол 10° (рис. 6.13). С помощью передатчика, установленного на космическом аппарате, периодически "освещается" участок l поверхности планеты, оказавшийся в пределах диаграммы направленности антенны.

Элементы поверхности в пределах этого участка находятся на разном расстоянии и имеют разные радиальные скорости относительно космического аппарата. Поэтому отраженные ими и принятые на космическом аппарате сигналы неодинаково запаздывают и имеют разную частоту вследствие эффекта Доплера. Например, точка A находится ближе к космическому аппарату, чем точка B , и отраженные ею сигналы приходят раньше. С другой стороны, точка C приближается к аппарату и отраженные ею сигналы имеют более высокую частоту, чем сигналы, отраженные точкой D , которая удаляется. Это и используется при наземной обработке для разделения сигналов, отраженных отдельными элементами поверхности, и построения "кадра" радиолокационного изображения. В проекции на плоскость линии равного запаздывания представляют концентрические окружности с центром в точке O под космическим аппаратом, линии равного доплеровского смещения — конические сечения. Отдельные кадры, получаемые по мере движения космического аппарата, объединяются в сплошную полосу (см. рис. 6.13).

Радиовысотомер служит для измерения профиля высот поверхности планеты по трассе полета. Непосредственно измеряется высота космического аппарата SO относительно среднего уровня поверхности в освещаемом пятне 2 под аппаратом (см. рис. 6.13). Местный радиус планеты вычисляется как разность между расстоянием аппарата от центра планеты и измеренной высотой. При разделении отраженных сигналов только по времени запаздывания размер пятна поверхности, относительно которого измерялась высота космического аппарата, составлял 40—50 км. Использование возможности разделения отраженных сигналов также и по доплеровскому смещению позволило сузить размер пятна на трассе полета до 6—14 км (см. рис. 6.13). Среднеквадратичная погрешность измерения высоты, определенная по разбросу измерений над ровной местностью, оказалась равной 30 м.

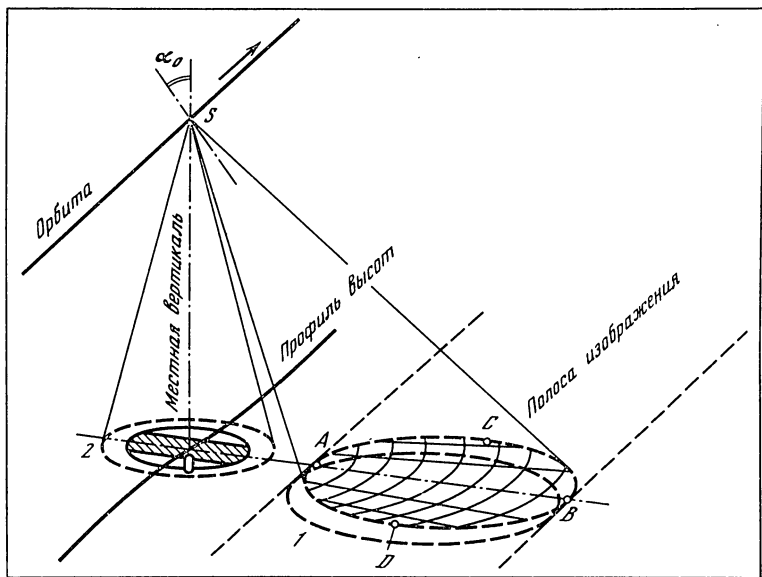


Рис. 6.13. Схема радиолокационной съемки с космического аппарата

1, 2 — участки поверхности планеты, попадающие в диаграмму направленности антенны радиолокационной станции с синтезированной апертурой и радиовысотомера. Штриховкой показан участок поверхности планеты, относительно которого измеряется высота космического аппарата при разделении отраженных сигналов радиовысотомера не только по запаздыванию, но и по частоте

Космические аппараты "Венера-15 и -16" в октябре 1983 г. были выведены на орбиты спутников Венеры с периодом обращения 24 ч. Минимальное расстояние аппаратов от поверхности Венеры (в перигентре) составляло 1000 км и приходилось примерно на 62° с.ш. Максимальное расстояние (в апоцентре) 66000 км. Наклонение плоскости орбиты к экватору Венеры $92,5^\circ$.

Результаты радиолокационной съемки. При прохождении космических аппаратов вблизи планеты за 16 мин ежедневно снималась полоса поверхности шириной около 120 км и длиной 7500 км, вытянутая вдоль трассы полета. Обычно съемка начиналась на широте 80° за северным полюсом Венеры. Аппарат проходил вблизи него и, двигаясь примерно вдоль меридиана, заканчивал съемку на широте 30° . За 24 ч Венера поворачивалась вокруг своей оси на $1,5^\circ$, и при следующем прохождении космического аппарата снималась новая полоса поверхности, частично перекрывающаяся с предыдущей. Длина полосы съемки определялась рабочим диапазоном высот радиолокационной системы от 1000 до 2000 км.

В качестве примера на рис. 6.14 (см. вкл.) (внизу) изображен район Гор Максвелла Венеры с кратером диаметром около 100 км, названным ранее Патерой Клеопатры. По горизонтальной оси отложено угловое расстояние относительно перигентра орбиты, по вертикальной — угловое расстояние относительно плоскости орбиты, измеренные в гра-

дусах из центра планеты (1° на поверхности Венеры занимает 105,6 км). Положению трассы соответствует 0° по вертикальной шкале. Длина приведенного фрагмента 1100 км при полной ширине изображенной полосы 156 км (195 элементов по 0,8 км). Изображение построено в предположении, что поверхность Венеры — сфера радиусом 6051 км⁷. Отклонения местного радиуса от этой величины проявляются в нерегулярном смещении границ по вертикали, видимом на изображении. Плавное смещение границ вызвано изменением высоты аппарата при его движении по эллиптической орбите.

Космический аппарат двигался слева направо, его трасса проходит выше снятой полосы. Чем больше мощность отраженных сигналов, тем светлее образования на изображении. Склоны, обращенные к падающему лучу, выглядят светлыми; склоны, отвернутые от него, — темными. Крупномасштабные вариации яркости подавлены при обработке для лучшей различимости деталей. С радиолокационным изображением совмещен профиль высот (рис. 6.14, вверху), полученный тремя днями раньше, трасса которого показана белой линией. Максимальная высота горного массива для данного профиля составляет 11 км над уровнем средней поверхности радиусом 6051 км.

Кратер, который пересекала трасса измерений высоты, расположен на склоне горного массива и имеет сложную форму. Из сопоставления изображения с профилем следует, что внутри большего кратера глубиной около 1,5 км находится второй, меньшего диаметра, дно которого опущено еще на 1 км. Заметим, что значительное отклонение местного радиуса от величины 6051 км, принятого за радиус сферы, на которую наносится изображение, привело к заметным перспективным искажениям формы кратера, которое было учтено при нанесении трассы радиовысотомера на изображение.

Карты поверхности Венеры. За 8 мес, в течение которых велась регулярная радиолокационная съемка, Венера сделала полный оборот вокруг своей оси, и под орбитой оказалась та же самая область, что была в начале съемки. Снята территория от северного полюса Венеры до параллели 30° с.ш. Ее площадь составляет 25% от общей площади поверхности Венеры. Вся снятая территория разбита на 27 частей, для каждой из которых цифровыми методами построены фотокарты и топографические карты. При построении фотокарт учитывалась высота местного рельефа по данным измерений радиовысотомера.

В качестве примера на рис. 6.15 (см. вкл.) приведена фотокарта Гор Максвелла и окружающей области Венеры, построенная по результатам радиолокационной съемки с космических аппаратов "Венера-15 и -16" с 30 декабря 1983 г. по 1 февраля 1984 г. Общая площадь территории, представленной на фотокарте, составляет $3,75 \cdot 10^6$ км². Фотокарта содержит $5,85 \cdot 10^6$ точек. Это наиболее детальное изображение Гор Максвелла из всех существующих [52]. При радиолокационной съемке Венеры космическим аппаратом "Пионер—Венера" [43] было установлено, что Горы Максвелла — самая высокая область Венеры, однако низкое пространственное разрешение затрудняло анализ их при-

⁷ Рекомендация Международного астрономического союза.

роды. Общее строение центральной части горного района с кратером Клеопатры, имеющего шероховатую структуру, достаточно хорошо просматривается на радиолокационных изображениях, полученных в последнее время с Земли в Аресибо [53]. Однако окружающие пространства с более гладкой поверхностью плохо видны вследствие низкого уровня отраженного сигнала.

Топографическая коррекция устранила перспективные искажения, видимые на рис. 6.14. Оба кратера, входящие в систему Патера Клеопатры, имеют приблизительно круглую форму. Внутренний кратер диаметром 55 км смещен к северо-западу относительно центра внешнего кратера диаметром 95 км.

С запада область кратера Клеопатры окаймлена почти параллельными хребтами, тянущимися на сотни километров. Друг от друга они отстоят на 5—15 км. По данным радиовысотомера здесь находится самая высокая область Венеры, где в овале протяженностью 400 км с севера на юг и 200 км с востока на запад высоты превышают уровень 10 км (над сферой радиусом 6051 км). В северной части овала в 200 км к западу от центра кратера Клеопатры (долгота 2,3°, широта 65,9°) находится наивысшая точка Венеры — 11,5 км⁸.

Наиболее резко высота убывает в юго-западном направлении. Здесь на протяжении 20 км горный массив снижается на 4 км и средний уклон превышает 10°. С этой стороны Горы Максвелла сдавлены массивной плитой Плато Лакшми высотой около 5 км и параллельные складки идут чаще. Складки, окаймляющие кратер Клеопатры, просматриваются и с востока, но здесь их структура нарушена поперечными сдвигами. Область, непосредственно окружающая кратер Клеопатры, выглядит более ровной. Здесь складки рельефа, по-видимому, засыпаны выбросом, возникшим при извержении или ударе метеорита, образовавшего кратер. Еще один кратер определенно ударного происхождения диаметром 25 км находится внизу, вблизи середины представленной территории (долгота 6,5°, широта 56,9°).

К югу Горы Максвелла переходят в Равнину Седны. В северной части горного массива складки собираются в "жгут", который, извиваясь и теряя высоту до 2 км, тянется в меридиональном направлении более чем на 500 км, а затем переходит в Равнину Снегурочки.

На севере и юге представленной территории просматриваются многочисленные группы куполообразных образований, особенно хорошо выделяющиеся на участках со спокойным рельефом поверхности. Весьма вероятно, что это конусы вулканического происхождения.

Особенности отражения радиоволн поверхностью Венеры. При прочих равных условиях мощность отраженных сигналов определяется удельной эффективной площадью обратного рассеяния поверхности планеты (см. введение). При небольших углах падения φ , когда вес диффузного рассеяния мал, эту величину можно представить в виде

$$\sigma(\varphi) = (\rho C/2)(1 + C \sin^2 \varphi)^{-1/2} \quad (6.20)$$

⁸ По данным радиовысотомера космического аппарата "Пионер—Венера" наивысшая точка Гор Максвелла находится на 220 км южнее (долгота 2,2°, широта 63,8°) и имеет высоту 11,1 км (также над уровнем сферы радиусом 6051 км).

(см. (6.10), (6.5) и (6.12)). При большом значении C , соответствующем сравнительно гладкой поверхности, ρ мало отличается от коэффициента зеркального отражения поверхности при нормальном падении [30].

Параметры ρ и C можно разделить, анализируя зависимость мощности отраженных сигналов от угла падения. Такую возможность дала совместная обработка измерений мощности отраженных сигналов радиовысотомера и радиолокационной станции с синтезированной апертурой космических аппаратов "Венера-15 и -16", электрические оси которых были направлены во время съемки вдоль местной вертикали и под углом 10° к ней соответственно.

Результаты исследования локальных характеристик отражения поверхности Венеры проиллюстрируем на примере высокогорного Плато Лакшми, расположенного к западу от Гор Максвелла. Плато высотой 2,5—5 км и размерами 1500×1500 км со всех сторон окружено горными хребтами. На востоке это Горы Максвелла, на западе и севере — Горы Акны и Фрей (высота 6—7 км), на юге — Уступ Весты.

Наиболее вероятное значение параметра C для поверхности Плато Лакшми — 130, что согласуется с данными, полученными для всей Венеры при радиолокации с Земли (см. рис. 6.4). Значение параметра C варьирует в основном в пределах 100—500. Наиболее гладкой является южная часть плато, где значение C превышает 500. Самое гладкое место представленной территории находится к северу от плато, на Равнине Снегурочки. Здесь среднее значение C составляет 1500, а его максимальное значение превышает 2500.

Сильной пересеченности рельефа в горных районах, окружающих Плато Лакшми, соответствует низкое значение параметра C . В районе Гор Акны и Фрей среднее значение C опускается до 20—40, а в районе Гор Максвелла — даже до 15.

Горные районы, окружающие Плато Лакшми, имеют повышенное значение коэффициента отражения. Для Гор Акны и Фрей оно в 1,5—2 раза, а для Гор Максвелла более чем в 2 раза выше, чем в среднем для поверхности Венеры (0,15 по измерениям с Земли и аппарата "Пионер—Венера" [54]). Это явление согласуется с понижением яркостной температуры в горных районах, обнаруженным сначала при анализе уровня шума приемника радиовысотомера космического аппарата "Пионер—Венера" [55], а затем СВЧ-радиометром аппаратов "Венера-15 и -16" [56]. Яркостная температура понижалась на величину до 230 К, причем лишь часть этого понижения может быть отнесена на счет понижения термодинамической температуры с высотой.

Форд и Петенгил [55] объясняют это явление наличием в горных районах Венеры каких-то минералов, увеличивающих коэффициент отражения и соответственно уменьшающих излучательную способность поверхности. По их оценкам, для наблюдаемого понижения яркостной температуры диэлектрическая проницаемость покрова горных районов должна достигать 20—35. Такими свойствами обладают сравнительно редкие на Земле соединения железа и свинца с серой. Другое предположение состоит в том, что покров горных районов имеет высокую удельную электропроводность, какая, скажем, наблюдается у окислов железа, что также приводит к снижению излучательной способности.

На поверхности Венеры обнаружены и другие интересные явления, вызванные аномальным характером отражения радиоволн. Так, например, в некоторых районах Венеры встречаются кратеры ударного происхождения, у которых дно выглядит необычно ярким [57]. Внутри некоторых из них уровень отраженных сигналов возрастает на 10 дБ по сравнению с окружающей местностью. Вероятно, это явление вызвано резким увеличением обратного отражения от сильно шероховатой поверхности, возникшей после удара метеорита.

6.5. ЭЛЕМЕНТЫ ВРАЩЕНИЯ ВЕНЕРЫ

В первых радиолокационных наблюдениях Венеры в Крыму в 1961 г. период вращения Венеры был оценен величиной, большей 100 сут [4]. Величина периода и направление вращения были установлены в 1962 г. по изменению ширины спектра отраженного сигнала ото дня ко дню.

Ширина спектральной линии отраженного сигнала пропорциональна угловой скорости вращения планеты относительно антенны радиолокатора. Это видимое вращение складывается из двух движений: собственного вращения планеты в инерциальной системе координат и переносного движения этой системы относительно антенны. Первая составляющая имеет постоянную величину и должна быть определена, в то время как составляющая вращения, связанная с переносным движением, определяется взаимным положением Венеры и антенны радиолокатора и может быть вычислена независимо. Эта составляющая максимальна в нижнем соединении, когда Венера проходит вблизи Земли.

Если бы, как и большинство больших планет, Венера имела прямое вращение, совпадающее с ее движением по орбите вокруг Солнца, то скорость результирующего вращения и ширина спектральной линии отраженного сигнала должны были иметь в нижнем соединении максимум, так как обе составляющие вращения одного знака. В случае обратного вращения знаки составляющих противоположны, а скорость результирующего вращения и ширина спектральной линии в нижнем соединении минимальны.

Края экспериментального спектра, соответствующие сигналам, отраженным крайними точками видимого экватора (точки B_1 , B_2 на рис. 6.1), нельзя было фиксировать из-за шума. Поэтому угловая скорость видимого вращения Венеры вычислялась путем сравнения экспериментальных спектров с некоторой моделью, для которой распределение отражательной способности по диску планеты вычислялось независимо из распределения энергии отраженных Венерой сигналов по времени запаздывания (см. рис. 6.2).

Оказалось, что спектральная линия отраженного сигнала в нижнем соединении имеет минимальную ширину, что указывает на обратное вращение Венеры, а изменение ширины линии соответствует периоду вращения около 300 сут. В Голдстоуне по наблюдениям 1962 г. период вращения Венеры оценен величиной около 250 сут при обратном вращении планеты [58].

Дальнейшее уточнение параметров вращения Венеры проводилось по изменению радиальной составляющей скорости локальных областей

поверхности планеты, имеющих на радиоволнах повышенную отражательную способность и наблюдающихся в спектре отраженного сигнала в виде определенных деталей [59, 10]. Отождествив положение нескольких таких областей в нижних соединениях 1964 и 1966 гг., В.К. Головкин получил уточненные значения периода вращения ($243,9 \pm 0,4$ сут) и координат вектора вращения: прямое восхождение $88 \pm 4^\circ$, склонение $68 \pm 3^\circ$ [12]. Отрицательное значение склонения отражает то, что вектор вращения (с конца которого вращение планеты должно быть видно против движения часовой стрелки) в экваториальной системе координат попадает в южную полусферу.

Период вращения Венеры близок к значению 243,16 сут, при котором Венера в каждом нижнем соединении должна быть обращена к Земле одним и тем же полушарием (синодический резонанс). В промежутке между соединениями, повторяющимися в среднем через 583,92 сут, Венера относительно Земли совершает четыре полных оборота. Продолжительность средних солнечных суток на Венере составляет 116,8 земных суток. Хотя попытки определить период и направление оси вращения Венеры предпринимались давно, только радиолокационный метод позволил получить достоверные данные о вращении Венеры.

Результаты дальнейшего уточнения периода вращения Венеры по радиолокационным наблюдениям в Крыму приведены ниже [60]:

Интервал наблюдений	1962 г.	1964—1966 гг.	1964—1972 гг.	1964—1975 гг.	1964—1977 гг.
Период вращения, сут	~300	$243,9 \pm 0,4$	$243,06 \pm 0,05$	$243,04 \pm 0,05$	$243,04 \pm 0,03$

Точность измерений растет с увеличением времени наблюдений. Резкое уменьшение ошибки на интервале 1964—1972 гг. связано с тем, что через 8 лет Венера и Земля оказываются почти в одних и тех же точках своих орбит и создаются одинаковые условия для наблюдения радиоярких областей диска Венеры.

Обработка всех данных, полученных в Крыму с 1964 по 1972 г., дала величину периода вращения Венеры $243,04 \pm 0,03$ сут. Анализ данных радиолокационных наблюдений Венеры на том же интервале времени в Аресибо, Голдстоуне и Хайстеке, проделанный Шапиро и др. [61], дал величину $243,01 \pm 0,03$ сут. Следовательно, если вращение Венеры и отличается от синодического резонанса, то это отличие очень мало, период меньше резонансного всего на 2—4 ч. Интересно отметить, что потребовалось бы 500—700 лет, чтобы Венера в нижнем соединении была бы обращена к Земле обратным полушарием.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Начиная с 1961 г., когда были осуществлены первые радиолокационные наблюдения Венеры, радиолокационный метод неизмеримо расширил наши сведения о строении поверхности, свойствах атмосферы, размерах и движении планеты Венера. Только радиолокация позволила определить период и направление вращения Венеры. С ее по-

мощью удалось установить природу отражающей поверхности Венеры и глубину ее атмосферы. Эти сведения послужили основой для организации в 1983 г. полета к Венере космических аппаратов "Венера-15 и -16" с целью радиолокационного картографирования ее поверхности.

В течение 8 мес с помощью космических аппаратов "Венера-15 и -16" была осуществлена детальная радиолокационная съемка северного полушария Венеры от полюса до широты 30°. Общая площадь снятой территории 115 млн км², что составляет 25% от площади поверхности Венеры. Пространственное разрешение радиолокационных изображений 1—2 км, точность измерения профиля высот поверхности до 30 м.

На полученных изображениях видны горные хребты, кратеры, плоскогорья, складки и разломы венерианской коры. Обнаружены многочисленные следы тектонической активности Венеры.

Для всей снятой территории построены фотокарты и топографические карты. Закрытая сплошным облачным слоем Венера стала доступной геологическому изучению, подобно Луне, Марсу и Меркурию. Дальнейшее развитие радиолокационных исследований еще больше расширит наши сведения о планетах Солнечной системы.

Глава 7

СОВЕТСКАЯ РАДИОАСТРОНОМИЯ И ПОИСКИ ВНЕЗЕМНЫХ ЦИВИЛИЗАЦИЙ

В последние 25 лет радиоастрономия, одна из самых молодых наук современности, оказалась тесно связанной с древнейшей проблемой существования и поиска разумной жизни во Вселенной. На стыке их образовалось новое научное направление, которое получило название "проблема СЕТИ" (Communication with Extraterrestrial Intelligence). Обзор советских исследований в этой области содержится в работе [1]. Настоящая глава представляет собой переработанный вариант этого обзора. Опущены некоторые детали, относящиеся к раннему этапу исследований. Более подробно изложено состояние проблемы в 80-е годы. Полностью переработан заключительный раздел.

7.1. ПЕРВЫЕ РАБОТЫ, НАЧАЛО ИССЛЕДОВАНИЙ

Принято считать, что современная постановка проблемы поиска внеземных цивилизаций (ВЦ) относится к 1959 г., когда появилась работа Дж. Коккони и Ф. Моррисона о возможности радиосвязи с ВЦ [2]. В 1960 г. в США были выполнены первые работы по поиску радиосигналов ВЦ (проект "Озма") [3]. В те же годы в научной печати появилось несколько серьезных публикаций о путях поиска внеземных цивилизаций [4—7]. В 1961 г. Национальная академия наук США провела специальное обсуждение этой проблемы в обсерватории Грин-Бэнк. Материалы этой конференции были освещены

щены в сборнике А. Камерона [8]; в 1965 г. этот сборник вышел в русском переводе [9].

Такова была обстановка, когда в 1962 г. в СССР появилась книга И.С. Шкловского "Вселенная. Жизнь. Разум" [10]. Эта книга, выдержавшая в нашей стране пять изданий и переведенная на многие иностранные языки, оказала огромное влияние на развитие исследований по проблеме ВЦ в Советском Союзе. Следующий важный шаг связан с работой Н.С. Кардашева "Передача информации внеземными цивилизациями" [11], предварительный вариант которой появился в 1963 г. В отличие от проектов, рассчитанных в основном на прием сигналов от цивилизаций, технический уровень которых близок к нашему, Кардашев предложил сосредоточить усилия на поисках сигналов от цивилизаций, технический уровень которых намного превосходит уровень нашей земной цивилизации. Как показали расчеты, подобные сверхцивилизации, располагающая мощностями порядка 10^{26} Вт и более, могут осуществить непрерывную изотропную передачу сигналов в широкой полосе частот, причем эти сигналы будут обнаружены (могут быть обнаружены) с помощью современных радиотелескопов при любых расстояниях в пределах Галактики или даже в соседних галактиках. По своим характеристикам такие широкополосные сигналы подобны шумовому излучению естественных радиоисточников, поэтому методы их обнаружения близки к обычным радиоастрономическим методам.

Кардашев рассчитал ожидаемый спектр искусственного источника, оптимальный диапазон волн и высказал предположение о возможных критериях искусственности. Все это открывало хорошие перспективы для широкого поиска ВЦ.

В 1963 г. в ГАИШ образовалась инициативная группа (Н.С. Кардашев, Л.М. Гиндилис, В.И. Слыш), которая ставила целью привлечь внимание научной общественности к проблеме поиска сигналов ВЦ и организовать практические работы по поиску сигналов. И.С. Шкловский, отнесшийся вначале скептически к этой идее, затем согласился поддержать ее. В конце 1963 г. он и Кардашев обсудили эту проблему с В.А. Амбарцумяном, который предложил провести научное совещание для разностороннего обсуждения и оценки состояния проблемы ВЦ.

Совещание состоялось в мае 1964 г. в Бюраканской астрофизической обсерватории. Это было первое Всесоюзное совещание по проблеме "Внеземные цивилизации". Оно было организовано Астрономическим советом Академии наук СССР, Государственным астрономическим институтом им. П.К. Штернберга и Бюраканской астрофизической обсерваторией [12]. Труды совещания изданы в Ереване в 1965 г. [13], а затем переведены на английский язык [14].

Круг вопросов, которые обсуждались на совещании, можно разбить на три группы: а) общие проблемы ВЦ (физические условия, необходимые для возникновения и развития жизни, множественность обитаемых миров и ожидаемая распространенность технически развитых цивилизаций, характер и уровень их развития, возможные типы

контактов); б) проблема установления связи с ВЦ (оптимальный диапазон частот, возможная длительность и информативность связи, ожидаемые свойства искусственных радиоисточников, методы их обнаружения); в) проблема языка для межзвездной связи.

Совещание пришло к выводу, что проблема контакта с внеземными цивилизациями является важной и актуальной научной проблемой, которая вполне назрела, поскольку имеются реальные предпосылки для постановки исследований и опытов в этом направлении. Была подчеркнута необходимость планомерного экспериментального и теоретического изучения проблемы ВЦ.

В отношении методики поиска сигналов на совещании выявились два подхода, две различные точки зрения. Первое направление — поиск сигналов от цивилизаций нашего или несколько более высокого уровня. Методика поиска подобных цивилизаций исходит из того, что для обеспечения разумной дальности связи передающая цивилизация использует узконаправленное и узкополосное излучение (узкополосность используется также в качестве признака искусственности). Для обнаружения подобных сигналов необходимо осуществлять поиск по частоте. Кроме того, поскольку направление поиска заранее неизвестно, цивилизация-отправитель вынуждена последовательно облучать все подходящие объекты в сфере выбранного радиуса. Таким образом, для исключения пропуска сигнала на приемном конце линии связи необходимо организовать непрерывно действующую систему обнаружения, охватывающую весь небесный свод и обеспечивающую поиск в пределах выбранного оптимального диапазона частот. Пример такой системы был предложен В.А. Котельниковым [15]. Идея использования узкополосных сигналов наиболее последовательно отстаивалась В.С. Троицким [16] и была поддержана многими участниками совещания. (В последующие годы это направление получило значительное развитие в США и привело к созданию многоканальных спектроанализаторов, содержащих до миллиона спектральных каналов.)

Второе направление, развиваемое Кардашевым [11, 17], — поиск сигналов от сверхцивилизаций (с уровнем энергопотребления $\geq 10^{26}$ Вт). При этом, поскольку речь идет о непрерывном широкополосном излучении, обнаружение подобных сигналов возможно с помощью обычной радиоастрономической аппаратуры. Здесь возникает задача детального исследования дискретных источников космического радиоизлучения с целью выявления искусственных источников в соответствии с ожидаемыми критериями искусственности. Некоторые из таких критериев (предельно малые угловые размеры, характерное спектральное распределение мощности, переменность во времени; круговая поляризация) были указаны Кардашевым. Это направление было поддержано И.С. Шкловским, Л.М. Гиндилисом, В.И. Слышем и С.Э. Хайкиным.

Совещание приняло решение развивать исследования в обоих направлениях. Оно рекомендовало организовать в ряде учреждений специальные секторы или группы для разработки отдельных вопросов проблемы ВЦ, а также предложило создать при Астросовете АН СССР

и Совете по радиоастрономии специальный планирующий и координирующий орган — Комиссию по межзвездной связи. Эти рекомендации были выполнены лишь частично (см. разд. 7.6).

В декабре 1964 г., по представлению В.А. Котельникова, бюро Отделения общей и прикладной физики АН СССР утвердило в составе Научного совета по комплексной проблеме "Радиоастрономия" секцию "Поиски сигналов от внеземных цивилизаций" (председатель секции В.С. Троицкий, заместитель председателя Н.С. Кардашев, ученый секретарь Л.М. Гиндилис). Позднее название секции было изменено, она стала называться секцией "Поиски космических сигналов искусственного происхождения".

Одним из первых шагов в деятельности секции была разработка Программы научных исследований по проблеме ВЦ в соответствии с рекомендациями Бюраканского совещания. В октябре 1965 г. на 5-й Всесоюзной конференции по радиоастрономии в Харькове впервые наряду с другими тематическими секциями работала секция по проблеме ВЦ. Начиная с 1968 г. вопросы связи с ВЦ регулярно обсуждались на конференциях научно-технического общества им. А.С. Попова (руководитель Н.Т. Петрович).

7.2. ПОИСКИ ВНЕЗЕМНЫХ ЦИВИЛИЗАЦИЙ В 60-е годы

Сразу же после первых обсуждений проблемы ВЦ в НИРФИ под руководством В.С. Троицкого началась разработка спектральной аппаратуры для поиска узкополосного излучения в дециметровом диапазоне. Использовался принцип параллельно-последовательного анализа спектра (табл. 7.1), который позволял осуществить просмотр полосы шириной 2 МГц со спектральным разрешением 13 Гц за время порядка 10 мин. В 1968 г. аппаратура была создана. Приемник работал на частоте 927 МГц, чувствительность по потоку при приеме на 15-метровую антенну $2 \cdot 10^{-21}$ Вт/м². К этому времени в ГАИШ под руководством Б.В. Кукаркина был подготовлен каталог подходящих с точки зрения поиска ВЦ звезд в радиусе 100 св. лет от Солнца. Наблюдения начались осенью 1968 г. с помощью 15-метровой антенны радиоастрономической станции НИРФИ в Зименках. В 1968—1969 гг. проведен цикл наблюдений 11 подходящих звезд: τ Кита, ϵ Эридана, 380 и 47 Большой Медведицы, β Гончих Псов, ρ Волос Вероники, η Геркулеса, ρ' Большой Медведицы, ψ Возничего, i Персея, η Волопаса, а также галактики М 31. Наблюдение каждого объекта длилось 10 мин. С точностью до потока $2 \cdot 10^{-21}$ Вт/м² монохроматического излучения на исследуемой волне от этих объектов в моменты наблюдений не обнаружено [18]. В дальнейшем работы по этой программе не возобновлялись.

В 1969 г. в НИРФИ начались исследования по поиску спорадических сигналов, приходящих с произвольного направления в пределах видимой полусферы. Эта задача по своему характеру близка к задаче поиска импульсных позывных ВЦ. Идея использования импульсных сигналов в качестве позывных для межзвездной связи

была высказана Кардашевым в 1965 г. в докладе на 5-й Всесоюзной конференции по радиоастрономии (в Харькове). Затем она развивалась Гиндилисом [19, 20], Петровичем [21] и др. В конце 60-х годов поиск импульсных сигналов и спорадического радиоизлучения стимулировался также попытками обнаружения естественных импульсных источников в связи с обсуждавшейся в то время возможностью существования радиовсплесков, сопровождающих всплески гравитационных волн, обнаруженных, как тогда полагали, Вебером.

Наблюдения, организованные под руководством В.С. Троицкого в НИРФИ, проводились с помощью всенаправленных антенн (принимающих излучение со всей видимой полусферы) на нескольких частотах в сантиметровом и дециметровом диапазонах. Поиск был начат на волне 50 см, а затем, после обнаружения спорадического излучения на этой волне, проводился также на волнах 30, 16, 8 и 3 см. Для исключения местных помех (а также свистящих атмосфериков) использовались одновременные наблюдения в нескольких далеко разнесенных пунктах. В 1969—1970 гг. наблюдения проводились: на Дальнем Востоке (Уссурийск), в Горьковской обл. (Пустынь), в Мурманской обл. (Тулома) и в Крыму (Карадаг). Радиометры позволяли зарегистрировать сигналы, соответствующие излучению неба с температурой от 3 до 300 К. Чувствительность по потоку составляла 10^{-22} Вт/(м²·Гц). Эти исследования привели к обнаружению ранее неизвестного спорадического радиоизлучения, генерируемого в верхних слоях ионосферы и в магнитосфере Земли под воздействием солнечных корпускулярных потоков [22—26].

В начале 1965 г. Кардашев выдвинул задачу проведения полных обзоров неба в наиболее благоприятном для межзвездной связи сантиметровом диапазоне волн с целью обнаружения и последующего исследования новых радиоисточников. Эта задача тесно смыкалась с актуальными задачами радиоастрономии. Для ее реализации Кардашев предложил построить меридианный радиотелескоп системы Дж. Крауса с предельно короткой волной порядка 4—8 мм. В отделе радиоастрономии ГАИШ в течение 1965 г. был разработан предэскизный проект такого радиотелескопа (Кардашев, Гиндилис, Слыш). Дальнейшее обсуждение этого проекта совместно с проектом антенны переменного профиля (АПП), выдвинутым ГАО АН СССР, привело к решению о создании радиотелескопа РАТАН-600, а задача проведения полных обзоров неба была записана в качестве основной задачи строящегося радиотелескопа (подробней см. [27, с. 120—123]).

Наряду с подготовкой обзоров неба в отделе радиоастрономии ГАИШ под руководством Кардашева проводились наблюдения пекулярных источников радиоизлучения с целью обнаружения их возможной искусственной природы. Особый резонанс вызвала обнаруженная Г.Б. Шоломицким переменность потока радиоизлучения СТА-102 с периодом 102 сут [28—30]. По характеру спектра и угловым размерам СТА-102 удовлетворял критериям Кардашева для искусственного источника, поэтому Кардашев выдвинул гипотезу о его возможной искусственной природе и на основе этой гипотезы предсказал переменность потока СТА-102. Работа Шоломицкого стимулировала актив-

ные исследования других квазизвездных источников, что привело к обнаружению фундаментального факта — переменности радиоизлучения квазаров. Шоломицкий проводил измерения с помощью антенны с круговой поляризацией. Последующие измерения, выполненные другими авторами на антеннах с линейной поляризацией, не обнаружили переменности СТА-102. По мнению Шоломицкого, это могло быть следствием его круговой поляризации (порядка 25% в диапазоне 30 см) [30]¹.

История исследования СТА-102 еще раз со всей остротой поставила вопрос о критериях искусственного источника. С открытием переменности квазаров, обнаружением мазерного излучения ОН и пульсаров все более четко стала вырисовываться ограниченность радиоастрономических критериев Кардашева (которые сохраняют, конечно, свое значение в качестве вспомогательного средства исследования) и необходимость разработки более строгих, однозначных критериев искусственного источника. Одно из направлений связано с разработкой критериев, основанных на исследовании статистической структуры сигнала. Впервые на эту возможность указал М. Голей [31]. Позднее этот вопрос исследовался В.И. Слышем [32], Л.И. Гудзенко и Б.Н. Пановкиным [33], В.И. Сифоровым [34]. Экспериментальное изучение статистической структуры сигнала применительно к космическим радиоисточникам (учитывая реально достигаемое отношение сигнал/шум) представляет собой весьма сложную задачу и требует применения специальной аппаратуры.

Интересная попытка такого исследования была предпринята по инициативе Кардашева группой сотрудников ГАИШ. Исследовалась статистическая структура радиоизлучения молекулы гидроксила ОН в источниках: W 3, NGC 6334 A, Sgr B2, W 49. Приставка к радиометру была разработана Г.М. Рудницким. Наблюдения проводились Г.М. Рудницким, М.И. Пашенко и В.И. Слышем в декабре 1970 г. на Большом радиотелескопе в Нансе (Франция). Ни для одного из указанных источников не обнаружено заметных отклонений от гауссового распределения амплитуд [35]. Этот результат не является тривиальным, так как можно было ожидать, что для когерентного мазерного излучения ОН функция распределения отличается от гауссовой. Последнее соображение показывает, что и статистические критерии тоже не вполне однозначны. С одной стороны, негауссовы характеристики в принципе могут встречаться у некоторых естественных источников. С другой стороны, при малой избыточности (когда используются оптимальные коды) искусственный сигнал по своим статистическим свойствам неотличим от шума.

По мнению ряда исследователей (В.С. Троицкий, П.В. Маковецкий и др.), наиболее простым и достаточно убедительным критерием искусственного сигнала является "высокая степень монохроматичности". Однако и этому критерию присущи общие недостатки

¹ Переменность потока СТА-102 была вновь обнаружена канадским радиоастрономом Дж. Ханстедом в 1972 г., а затем подтверждена другими исследователями. Высказывается предположение о "транзитном" характере его переменности: чередование периодов переменности и стабильности.

любого чисто физического критерия. Можно думать, что единственным достаточно строгим и убедительным критерием обнаружения сигнала ВЦ является наличие в нем определенной смысловой, содержательной информации.

Выделение содержательной информации приводит к задаче дешифровки сообщения. Эта задача применительно к произвольному тексту (написанному неизвестными символами на неизвестном языке), т. е. применительно к ситуации межзвездной связи, была строго сформулирована Б.В. Сухотиным. Он же разработал ряд алгоритмов для анализа таких текстов [36].

Важным направлением исследований в 60-е годы был кибернетический, системный подход к проблеме ВЦ, развивавшийся Б.Н. Пановкиным [37]. Он исходит из представления о ВЦ как сложной самоорганизующейся системе и соответственно рассматривает проблему ВЦ как часть более общей проблемы, включающей исследование генеральных принципов строения, функционирования и эволюции сложных самоорганизующихся систем (частным случаем которых является и автоматическое устройство, и живой организм, и биологическая эволюция, и человеческая цивилизация). В определенной мере такой подход оказался плодотворным, однако он также встречается с принципиальными трудностями и, как отметил сам Пановкин, его возможности также ограничены [38].

Много внимания в первые годы исследований уделялось вопросу об оптимальном диапазоне волн для межзвездной связи. Детальный анализ был выполнен Кардашевым [39]. Его подход к этому вопросу состоял в следующем. При выборе оптимального диапазона мы должны ориентироваться не на временные преимущества, возникающие благодаря прогрессу тех или иных технических средств связи, а на некоторые принципиальные ограничения, лежащие в природе вещей и общие для всех цивилизаций. Принципиально неустранимым источником шума при связи между ВЦ является излучение фона и квантовые флуктуации исследуемого сигнала. Кардашев рассмотрел два случая: 1) поиск позывных; 2) прием информативной передачи. В первом случае информативность канала связи не имеет существенного значения; задача сводится к определению диапазона спектра, в котором может быть обеспечено максимальное отношение сигнал/шум. Во втором случае задача ставится таким образом: задан спектр интенсивности космических шумов I_v и полный (интегральный) поток энергии от передатчика F в точке наблюдения; требуется определить оптимальное распределение энергии передатчика по спектру так, чтобы обеспечить максимальную скорость передачи информации. Решение этой задачи показало, что в обоих случаях существенная часть спектра искусственного источника лежит в радиодиапазоне, а при не очень больших потоках (т.е. в случае дальней передачи) спектр целиком лежит в радиодиапазоне, в области дециметровых, сантиметровых и миллиметровых волн².

² Впоследствии Н.С. Кардашев пересмотрел этот вопрос с учетом рассеяния радиоволн в межзвездной среде и пришел к выводу, что оптимальной является область миллиметровых волн, вблизи $\lambda = 1,5$ мм [40] (см. разд. 7.5).

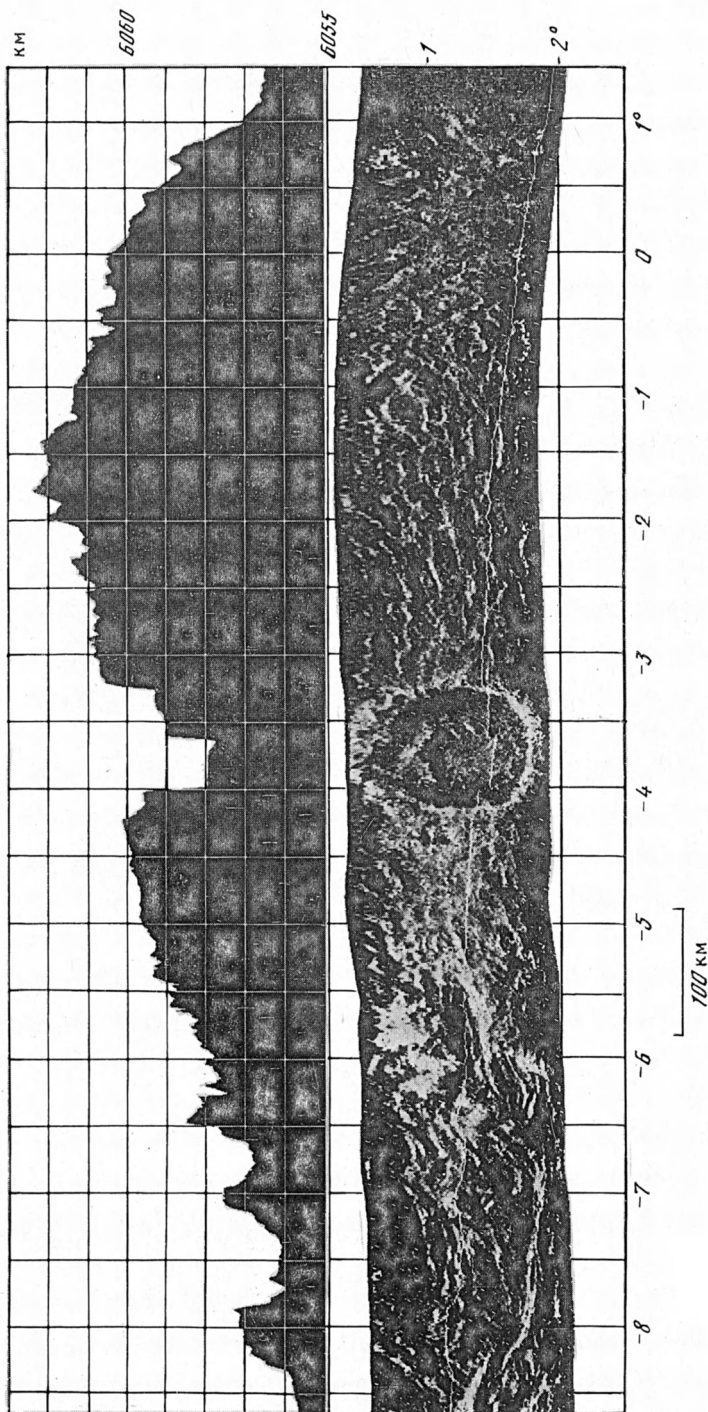


Рис. 6.14. Радиолокационное изображение района Гор Максвелла Венеры с кратером Клеопатры, полученное космическим аппаратом "Венера-16" 20 января 1984 г. (внизу), и профиль поверхности по трассе полета космического аппарата 17 января 1984 г. (вверху), отмеченной белой линией

По вертикальной оси для профиля указано значение радиуса поверхности планеты в данной точке (в км). Вертикальный масштаб увеличен в 32 раза по сравнению с горизонтальным

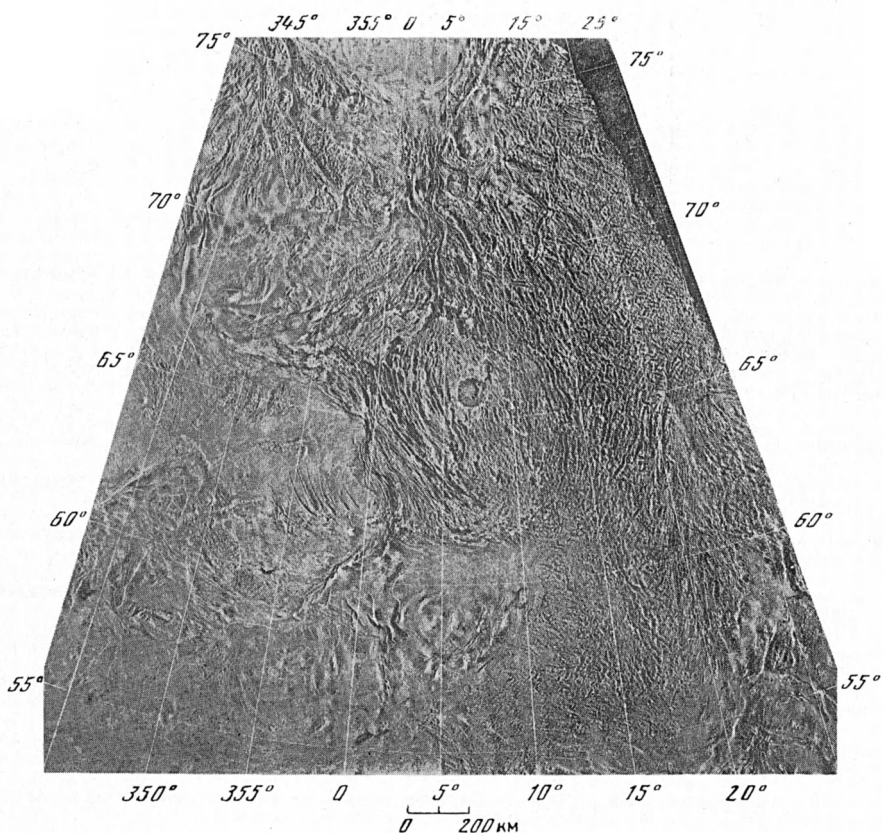


Рис. 6.15. Фотокарта Гор Максвелла и окружающей области Венеры, построенная по результатам радиолокационной съемки с космических аппаратов "Венера-15 и -16" с 30 декабря 1983 г. по 1 февраля 1984 г.

Долгота 345 — 25°, широта 55 — 75°. Проекция нормальная, равноугольная, коническая Ламберта—Гаусса. Стандартные параллели 58,3° и 72,4°. Радиоволны падают с востока под углом около 10° к местной вертикали

Исследования, проводимые в СССР в 60-е годы, нашли отражение в коллективной монографии, вышедшей в 1969 г. под редакцией С.А. Каплана [41]. В 1971 г. книга была издана на английском языке [42], а в 1972 г. — на чешском [43].

7.3. МЕЖДУНАРОДНОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО. БЮРАКАНСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ СЕТИ

Уже на первом Всесоюзном совещании по проблеме ВЦ в 1964 г. было обращено внимание на необходимость международного сотрудничества в этой области. В 1965 г. секция "Поиски космических сигналов искусственного происхождения" создала комиссию в составе В.С. Троицкого, Н.С. Кардашева, Л.М. Гиндилиса, В.И. Слыша, Ю.Н. Парийского для подготовки предложений о международной кооперации в области поиска сигналов ВЦ. Эти предложения через Астросовет АН СССР были направлены в Международный астрономический союз (МАС) на имя его генерального секретаря Ж. Пекера. В МАСе они встретили весьма сдержанное отношение.

Советская инициатива включала предложение о проведении научного обсуждения проблемы в рамках какого-либо подходящего международного форума. Одновременно проф. Р. Пешек, председатель Комиссии по астронавтике Чехословацкой академии наук, предложил Международной астронавтической академии (МАО) провести симпозиум по связи с внеземными цивилизациями — симпозиум СЕТИ³. В дальнейшем, несмотря на поддержку МАО, проведение симпозиума неоднократно откладывалось из-за различных организационных трудностей.

В этих условиях Н.С. Кардашев и К. Саган предложили в качестве первого шага провести двустороннюю советско-американскую конференцию. В 1970 г. была достигнута договоренность между Академией наук СССР и Национальной Академией наук США о проведении конференции СЕТИ как совместного мероприятия двух академий. Академия наук Армянской ССР предложила провести ее в Бюракане. Оргкомитет конференции возглавили: от СССР — В.А. Амбарцумян, от США — К. Саган. Из ученых других стран в работе конференции приняли участие: Ф. Крик (Великобритания), Р. Ли (Канада), Г. Маркс (Венгрия) и Р. Пешек (Чехословакия). В состав американской делегации входили 18 ученых, от Советского Союза приняли участие 32 человека. Полный список участников приводится в английском издании трудов конференции [45].

Конференция проходила с 6 по 11 сентября в Бюраканской астрофизической обсерватории [44]. Она носила широкий междисциплинарный характер, в ее работе приняли участие астрономы, физики, биологи, антропологи, историки, социологи, философы, лингвисты, специалисты в области теории информации и связи. Труды конфе-

³ Термин СЕТИ, предложенный Р.Пешек, постепенно вошел в употребление и стал общепринятым. В последние годы наряду с ним все чаще используется близкий термин SETI (Search for Extraterrestrial Intelligence).

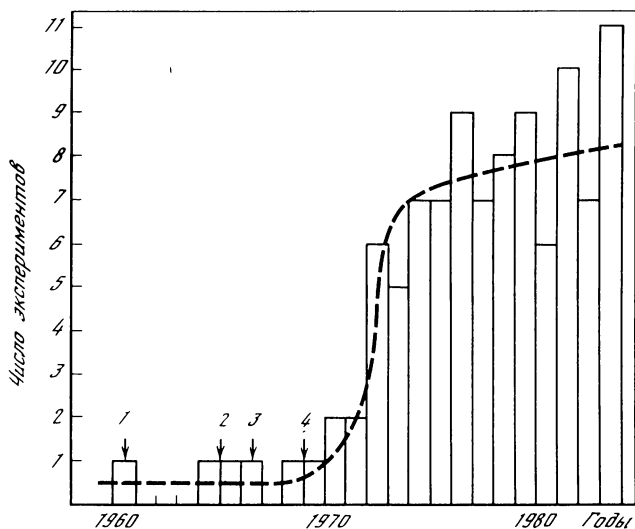


Рис. 7.1. Рост числа СЕТИ-экспериментов со временем (во всем мире) [50]

1 — Дрейк, "Озма"; 2 — Шоломницкий, СТА-102; 3 — Келлерман, галактика 1934-63; 4 — Троицкий, ближайшие звезды

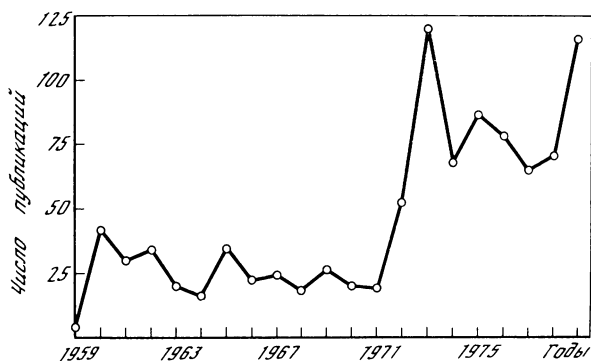


Рис. 7.2. Динамика числа публикаций по проблеме СЕТИ (во всем мире) [51]

ренции опубликованы на английском языке в 1973 г. [45] и на русском — в 1975 г. [46] (эти издания не являются полностью аутентичными); резолюция конференции опубликована в *Астрономическом циркуляре* [47].

В период подготовки Бюраканской конференции советский оргкомитет разослал ее участникам (а также некоторым другим ученым) специальную анкету с целью выяснения их мнения по отдельным аспектам проблемы СЕТИ. Часть ответов была опубликована в журнале *"Земля и Вселенная"* в 1972 г. [48]. Полный анализ этого материала предполагалось опубликовать в русском издании трудов конференции, однако, к сожалению, сделать этого не удалось.

Бюраканская конференция оказала существенное влияние на разви-

тие исследований в области СЕТИ как в нашей стране, так и за рубежом. В октябре 1972 г. в рамках 23-го конгресса МАФ в Вене впервые был проведен Международный симпозиум по проблеме СЕТИ. Он был организован МАА и проходил под председательством Р. Пешека, который выступил с содержательным докладом по истории исследований в области СЕТИ [49]. Начиная с этого времени, симпозиум МАА по СЕТИ стал традиционным, он ежегодно проводится в рамках Международных астронавтических конгрессов. С начала 70-х годов резко возросло число экспериментов и число публикаций по СЕТИ (рис. 7.1 и 7.2). В этом, несомненно, сказалось влияние Бюраканской конференции [50, 51].

7.4. ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ СЕТИ В 70-е годы

Первая половина 70-х годов в значительной мере прошла под знаком Бюраканской конференции СЕТИ. Большое внимание в эти годы было уделено выработке стратегии и программы исследований в области СЕТИ. Программа одобрена Советом по радиоастрономии АН СССР и вышла отдельной брошюрой в 1974 г. [52], а затем опубликована в Астрономическом журнале [53]. Она привлекла значительное внимание за рубежом [54, 55], особенно в США. В отчете исследовательского центра Эймса, подготовленного для НАСА [56], советская программа воспроизведена полностью. Касаясь сотрудничества с Советским Союзом, авторы отмечают, что имеются благоприятные возможности для такого сотрудничества [56, с. 33].

В начале 70-х годов продолжались эксперименты по поиску спорадических радиосигналов. В 1972 г. в НИРФИ наряду с наземными пунктами на территории Советского Союза было организовано наблюдение на борту научно-исследовательского судна "Академик Курчатов", совершавшего рейс в экваториальных водах Атлантики. Эти исследования [24—26, 57] подтвердили ранее полученные результаты (см. разд. 7.2).

В те же годы к поискам спорадических сигналов присоединилась группа московских радиоастрономов (ИКИ АН СССР и ГАИШ) под руководством Н.С. Кардашева. Здесь была поставлена задача поиска импульсных позывных ВЦ. Для выделения импульсов космического происхождения наряду с совпадением по времени в разных пунктах предполагалось использовать запаздывание низкочастотных составляющих из-за дисперсии в межзвездной среде. Этот метод получил название метода синхронного дисперсионного приема [58, 59]. Приемник состоял из широкополосного маломощного усилителя в диапазоне 350—550 МГц и четырех фильтров, настроенных на частоты 371, 408, 458, 535 МГц с полосой 5 МГц. Сигналы принимались одновременно во всей полосе 350—550 МГц и в узкополосных каналах, после детектирования и усиления они регистрировались на бумажную ленту пятиканального самописца. Наблюдения проводились осенью 1972 г. в двух пунктах, на Кавказе и на Памире, а также в 1973 г. на Кавказе, Камчатке и на борту АМС "Марс-7". На Кавказе и на Камчатке, помимо приемников, работающих в диапа-

зоне 350—550 МГц, использовались приемники на частотах 38 и 60 МГц; на тех же частотах (38 и 60 МГц) работали радиометры АМС "Марс-7". В результате этих исследований было выявлено несколько типов совпадающих сигналов, часть из них соответствует спорадическому радиоизлучению Солнца, часть связана с излучением ИСЗ.

С середины 70-х годов синхронные наблюдения импульсных сигналов с ненаправленными антеннами прекратились. В ИКИ метод синхронного дисперсионного приема стал использоваться в сочетании с направленными антеннами (РТ-22, Крым—Серпухов) для анализа отдельных пекулярных источников. В НИРФИ регистрация спорадического излучения с ненаправленными антеннами продолжалась лишь в одном пункте (Карадаг). С конца 70-х годов в НИРФИ началась разработка системы обнаружения, состоящей из нескольких десятков антенн небольшой направленности (см. разд. 7.5).

Продолжались работы по исследованию статистической структуры радиоизлучения источников ОН (Г.М. Рудницкий, Е.Е. Лехт, М.И. Пашенко, В.И. Слыш). В апреле—мае 1972 г. ими проведены новые наблюдения источников ОН на радиотелескопе Нансе со значительно лучшим отношением сигнал/шум. Результаты этих исследований [60] подтвердили выводы предыдущей работы [35] о шумоподобном характере мазерного излучения ОН. Позднее авторы наряду с распределением амплитуд исследовали также распределение интервалов времени между нулями сигнала [61]. Это также подтвердило первоначальный вывод. Более интересные данные были получены группой Н.С. Кардашева в отношении центра Галактики, где были обнаружены отклонения от нормального распределения для флуктуаций интенсивности непрерывного спектра на волне 3,5 см [62].

Большое внимание в программе SETI было уделено обзорам неба с помощью радиотелескопа РАТАН-600. Телескоп вступил в строй в 1977 г. Программа обзоров была начата в 1979 г. Обзоры ведутся на нескольких частотах в сантиметровом диапазоне [27, с. 136—137].

Новые идеи относительно поиска сигналов ВЦ были высказаны П.В. Маковецким. Главная трудность состоит в неопределенности всех существенных параметров сигнала. Маковецкий предположил, что ВЦ осуществляют передачу позывных в виде узкополосных синусоидальных сигналов на частотах πF_H и F_H/π , где F_H — частота радиолинии водорода 21 см, и предложил вести поиск подобных сигналов. По его мнению, это не только сокращает неопределенность в частоте, но и позволяет установить искусственный характер сигнала [63, 64]. Для сокращения неопределенности во времени он предложил использовать синхронизацию по вспышкам сверхновых и новых звезд и рассчитал моменты связи для нескольких ближайших звезд, используя в качестве "синхросигнала" вспышку Новой Лебеда 1975 г. [65]. Наконец, для сокращения неопределенности в направлении он предложил сосредоточить поиск в направлении некоторых важных пекулярных объектов (таких, как Крабовидная туманность, Кассиопея А и др.), которые предположительно пред-

ставляют интерес для всех цивилизаций Галактики [66]. В сентябре 1978 г., в расчетные даты на РАТАН-600 были предприняты поиски сигнала от Летящей звезды Барнарда; эти попытки не увенчались успехом [67].

Наряду с проведением наземных экспериментов программа СЕТИ предусматривает создание и использование крупных космических радиотелескопов (КРТ). Возможность использования КРТ для целей СЕТИ обсуждается в работе [68]. Важной вехой на пути реализации этих планов явился запуск в СССР в июле 1979 г. на орбитальной пилотируемой станции "Салют-6" космического радиотелескопа КРТ-10 (подробней см. [27, с. 126—128]).

Интересная попытка поиска сигналов ВЦ в оптическом диапазоне была предпринята группой сотрудников САО АН СССР под руководством В.Ф. Шварцмана. Использовался комплекс аппаратуры для анализа сверхбыстрой оптической переменности (с характерным временем от $3 \cdot 10^{-7}$ до 10^2 с) [69—72]. Перечень астрофизических задач и обоснование применения комплекса для поиска ВЦ приводятся в работе [69]. Более подробное обоснование содержится в [75]. Основные достоинства оптического канала: высокая пропускная способность и легкость осуществления остронаправленной передачи. На этом основании можно считать, что если позывные ВЦ целесообразно искать в радиодиапазоне, то для поиска информативной передачи надо использовать оптический или даже рентгеновский диапазон спектра. В этом плане наиболее интересными, по мнению Шварцмана, являются точечные объекты, обладающие переменным радио- и оптическим излучением, а также нетепловыми спектрами, полностью лишенными линий. Список подобных объектов приводится в [75]. В 1973—1974 гг. в САО АН СССР проведены первые наблюдения источников из этого списка [73, 74], а в 1979 г. выполнены наблюдения 17 объектов на 6-метровом телескопе БТА [75]. Анализ этих наблюдений показал отсутствие переменности в диапазоне $3 \cdot 10^{-7}$ — 10^2 с, а также отсутствие в спектрах исследованных источников мощных сверхузких ($\Delta\lambda \leq 10^{-6}$ Å) лазерных линий. Все записи этого эксперимента хранятся на магнитных накопителях ЭВМ. Предполагается их повторная обработка по более сложным алгоритмам выделения слабых сигналов. Необходимо отметить оригинальность подхода, серьезность обоснования и высокий экспериментальный уровень, на котором выполнены эти исследования. По поиску оптических сигналов Советский Союз занимает лидирующее место в мире. Важным достоинством этих исследований является удачное сочетание с актуальными астрофизическими задачами, что позволяет избежать трудностей, связанных с отрицательными результатами поиска сигналов.

В 70-х годах в СССР получили развитие исследования, связанные с разработкой релятивистской теории межзвездных перелетов (У.Н. Закиров, Б.К. Федюшин и др.). Это самостоятельное направление, по которому имеется обширная литература. Укажем здесь лишь на цикл работ У.Н. Закирова, связанных с задачами поиска ВЦ [76—78].

Изучение возможностей связи с ВЦ приводит к постановке ряда вопросов общенаучного и философского порядка. Многие из них обсуждались на ежегодных Чтениях, посвященных разработке научного наследия и развитию идей К.Э. Циолковского; результаты этих обсуждений опубликованы в трудах Чтений. Несколько полезных дискуссий было организовано Институтом философии АН СССР, результаты их нашли отражение в сборнике [79, с. 252—395]. Принципиальные трудности, возникающие при контактах с ВЦ, были указаны Б.Н. Пановкиным. По его мнению, контакт между цивилизациями по каналам связи (вне общей производственной деятельности по преобразованию окружающей среды) невозможен [38, 80]. Хотя эта точка зрения во многих отношениях является спорной, критика, проведенная Пановкиным, оказалась полезной для оценки реального состояния проблемы. Важное направление, связанное с разработкой проблемы контакта между различными высокоорганизованными системами (включая разработку языков-посредников) проводится в Институте кибернетики АН УССР под руководством И.М. Крейн [81—87].

В 1975 г. САО АН СССР совместно с Научным советом по радиоастрономии АН СССР организовала в станции Зеленчукской Всесоюзную школу-семинар по проблеме СЕТИ [88]. К сожалению, труды школы полностью не опубликованы, однако они легли в основу сборника [89].

Именно здесь И.С. Шкловский впервые выступил с концепцией уникальности нашей земной цивилизации. В 1976 г. он опубликовал подробную статью с обоснованием этой точки зрения [90]. Эта работа, возрождавшая старый спор о множественности обитаемых миров, явилась отражением тех трудностей (объективных и субъективных), с которыми столкнулась проблема СЕТИ в процессе своего развития. Концепция уникальности не получила в СССР широкой поддержки. С критикой ее выступил Н.С. Кардашев [91], В.С. Троицкий и др. [92]. Интересная полемика по этой проблеме между И.С. Шкловским и С. Лемом опубликована в журнале "Знание — сила" [93, 93а].

Дискуссия о множественности обитаемых миров стимулировала попытки более строгого подхода к оценке числа коммуникативных цивилизаций. Пример такого подхода, основанного на использовании статистических методов с учетом времени эволюции до стадии ВЦ и времени жизни цивилизаций (точнее длительности коммуникативной фазы), содержится в работах [94, 95], в которых рассматривается вопрос о природе вероятностей, входящих в формулу Дрейка. Следует подчеркнуть, что полученные на основе подобных оценок данные о вероятном числе коммуникативных цивилизаций в Галактике или о вероятном расстоянии между ними могут использоваться в задачах СЕТИ как исходный элемент гипотезы, лежащей в основе той или иной стратегии поиска, но они не дают, конечно, решения проблемы существования ВЦ.

В связи с проблемой "космического чуда" (на отсутствие которого существенно опирается концепция уникальности) В.С. Троиц-

кий детально проанализировал возможность создания мощных все-направленных маяков-передатчиков для межзвездной связи. Он пришел к выводу, что необходимость сохранения среды обитания (имеется в виду околозвездная среда) приводит к энергетическим ограничениям, которые не позволяют реализовать мощный передатчик, соответствующий цивилизациям II и III типа (по Н.С. Кардашеву). По оценкам Троицкого, от изотропных передатчиков можно ожидать только весьма слабые сигналы, для приема которых требуется сооружение очень крупных радиотелескопов [96].

С другой стороны, для преодоления парадокса "ненаблюдаемости"⁴ Троицкий выдвинул совершенно новую оригинальную концепцию однократного (и одновременного) происхождения жизни во Вселенной [97]. Эта идея чрезвычайно интересна в общенаучном и философском плане, однако попытки преодолеть с ее помощью парадокс "ненаблюдаемости" представляются столь же спорными, как и концепция уникальности. По существу, они сводятся к попытке обосновать уникальность нашей цивилизации в другом плане — как наиболее развитой во Вселенной. Между тем логически допустим еще ряд возможностей, в том числе кратковременность экстенсивной технологической фазы развития ВЦ. Тогда общее число цивилизаций в Галактике может быть очень велико, но они не проявляют себя в техническом отношении. Возможность такой ситуации, отмеченная еще С. Лемом, подчеркивается в ряде работ. Этот вопрос детально анализируется в монографии В.В. Рубцова и А.Д. Урсула [98].

7.5. СИМПОЗИУМ В ТАЛЛИНЕ.

SETI В НАЧАЛЕ 80-х годов (1980—1985)

Начало 80-х годов было отмечено некоторым усилением активности в области SETI в СССР. В 1980 и 1981 гг. в рамках XV и XVI Чтений К.Э. Циолковского были проведены однодневные симпозиумы, посвященные проблеме поиска ВЦ. Они сыграли важную роль в установлении творческих связей между учеными, работающими в области SETI, и философами, занимающимися разработкой философских проблем ВЦ. Вместе с тем они явились своего рода подготовкой к Всесоюзному симпозиуму "Поиск разумной жизни во Вселенной" ("SETI — Таллин, 81"), который проходил с 8 по 11 декабря 1981 г. в Таллине [99].

Симпозиум был организован Академией наук СССР, Академией наук Эстонской ССР и Минвузом РСФСР. В его работе приняли участие около 200 советских и 19 зарубежных ученых (из Болгарии, Венгрии, Польши, США, Франции и Японии). Особенно представительной была американская делегация, которую возглавлял Ф.Дрейк.

⁴ В западной литературе его часто называют "парадокс Ферми", поскольку последнему приписываются слова: "Where are They?" или "Where is Everybody". В советской литературе используется термин "космическое чудо" (принадлежащий И.С. Шкловскому) и "астросоциологический парадокс" (АС-парадокс).

В отличие от Первого Всесоюзного совещания по проблеме ВЦ (Бюракан, май 1964) симпозиум в Таллине был гораздо более представительным, и на нем рассматривался более широкий круг вопросов: астрономические и космологические предпосылки возникновения жизни во Вселенной, методы поиска внесолнечных планетных систем, происхождение жизни на Земле и возможность происхождения жизни на других небесных объектах, вопросы эволюции жизни, возникновение и закономерности развития космических цивилизаций, философские и социальные аспекты ВЦ. Большое внимание было уделено обнаружению планетных систем у других звезд, впервые обсуждалась проблема межзвездных перелетов. Однако главное внимание по-прежнему было уделено обсуждению методики и стратегии поиска ВЦ.

Американские участники (Ф. Дрейк, С. Гулкис, П. Горовиц, Б. Оливер) доложили программу поиска сигналов ВЦ, которая ориентируется на поиск узкополосных (до 0,01 Гц) немодулированных сигналов с помощью многоканальных (до 10^7 каналов) спектральных анализаторов. Н.Т. Петрович обосновал целесообразность применения относительных методов передачи и приема сигналов в системе СЕТИ с использованием модулированных по фазе синусоидальных либо широкополосных шумоподобных сигналов [100].

На совещании подвергся пересмотру вопрос об оптимальном диапазоне волн для межзвездной связи. Ранее полагалось, что оптимальным для поиска позывных ВЦ является диапазон дециметровых и сантиметровых волн, где интенсивность фона космического излучения минимальна. В 1971 г. в докладе на Бюраканской конференции СЕТИ Л.М. Гиндилис рассмотрел один тип позывных, для которых максимальное отношение сигнал/шум обеспечивалось в миллиметровом диапазоне ($\lambda \cong 5$ мм) [20]. В 1979 г. Н.С. Кардашев проанализировал вопрос об оптимальном диапазоне в общем случае (безотносительно к какому-то определенному типу сигналов) с учетом излучения фона и влияния межзвездной среды на распространение радиоволн и некоторых других факторов. Он пришел к выводу, что оптимальной должна быть область миллиметровых волн ($\lambda \cong 1,5$ мм) в этом диапазоне находится радиолиния позитрония $\lambda = 1,47$ мм [40]. В.С. Троицкий в докладе на Таллинском симпозиуме привел дополнительные аргументы в пользу миллиметрового диапазона, исходя из энергетических соображений. Этот вывод был поддержан Ф. Дрейком. Таким образом, на симпозиуме наметился определенный сдвиг к поиску сигналов в миллиметровом диапазоне волн.

При обсуждении стратегии поиска выявилось разнообразие исходных посылок, что приводит к различным представлениям об оптимальной стратегии СЕТИ. Совещание рекомендовало проводить широкий поиск, в рамках которого каждый разумно обоснованный проект заслуживает внимания и поддержки. В ходе обсуждения на симпозиуме высказывались различные мнения и оценки, но участники его были единодушны в том, что проблема поиска разумной жизни во Вселенной имеет важнейшее научное, философское и общественное значение. По своему характеру (отмечалось в решении) эта проблема является общечеловеческой, и, хотя отдельные исследования и отдель-

ные программы могут выполняться в национальном масштабе (на национальной основе), она требует самого широкого международного сотрудничества. Труды симпозиума легли в основу сборника [101], поскольку в него вошли не все материалы, представляют интерес также тезисы докладов, опубликованные ранее [102].

В 1982 г. ряд видных советских ученых поддержали акцию К. Сагана (США), подписав Международную петицию, которая призывает к организации всемирных и систематических поисков ВЦ [103, 104]. Петицию подписали более 70 крупнейших ученых мира, в том числе шестеро советских ученых: В.Л. Гинзбург, Н.С. Кардашев, М.Я. Маров, Р.З. Сагдеев, В.С. Троицкий, И.С. Шкловский.

К началу 80-х годов в отношении общественного мнения в целом (а также мнения научного сообщества) к проблеме СЕТИ произошел определенный сдвиг в сторону признания ее значимости. Это нашло отражение и в позиции МАС. В августе 1982 г. 18-я Генеральная ассамблея МАС единодушно одобрила предложение Исполкома МАС об утверждении в составе МАС новой Комиссии N 51 "Поиск внеземной жизни". Председателем Комиссии был избран М. Папаяннис (США), вице-председателями — Ф. Дрейк и Н.С. Кардашев. От Советского Союза в состав оргкомитета Комиссии вошел также В.С. Троицкий [105—107].

В 1984 г. Комиссия организовала симпозиум "Поиск внеземной жизни: последние достижения", который проходил в Бостоне (США) [108]. Труды симпозиума опубликованы в 1985 г. [109]; из советских работ на нем было представлено два доклада: Н.С. Кардашева [110] и В.И. Слыша [111]. В 1985 г. Генеральная ассамблея МАС в Дели утвердила новое название Комиссии: "Биоастрономия: поиск внеземной жизни". В июне 1987 г. в Венгрии состоялась Вторая международная конференция, организованная Комиссией N 51 (коллоквиум N 99 МАС под названием "Биоастрономия — следующие шаги"). Наряду с образованием Комиссии N 51 МАС в 80-е годы активизировалась деятельность Комитета СЕТИ МАА.

В СССР в эти годы исследования в области поиска ВЦ проводились в следующих направлениях. С 1982 г. по инициативе Н.С. Кардашева началось составление каталога SETI-объектов (т.е. объектов, перспективных с точки зрения SETI). В рамках этих работ В.Г. Сурдин проанализировал условия в шаровых скоплениях и показал, что у звезд шаровых скоплений возможно существование планет земного типа. Из каталога шаровых скоплений Галактики (насчитывающего 130 объектов) им отобраны кандидаты для поиска (перехвата) радиосигналов межзвездной связи [112]. В.А. Захожай и Т.В. Рузмайкина проанализировали список ближайших звезд (с расстоянием меньше 10 пк) и выбрали кандидатов для поиска планетных систем по ряду критериев: а) все звезды в радиусе 3 пк; б) одиночные звезды солнечного типа; в) звезды с невидимыми спутниками и т.д. [113].

В.С. Троицкий проанализировал вопросы стратегии поиска ВЦ [114, 115]. Под его руководством в НИРФИ разрабатывается система обнаружения "Обзор" [67]. Она будет состоять из несколь-

ких десятков радиотелескопов, работающих в диапазоне 52 см. Диаграмма каждой антенны будет составлять около 15° , в совокупности они будут перекрывать весь небесный свод. Приемная аппаратура обеспечит прием сигналов круговой и линейной поляризации; каждый приемник будет иметь 10 каналов шириной по 200 кГц (общая полоса анализа 2 МГц); чувствительность по потоку для каждого канала составит 10^{-19} Вт/м². Одновременно с этой системой планируется использовать два радиотелескопа с всенаправленной дипольной антенной. Один из них будет оборудован многоканальным приемником с полосой каждого канала до 100 Гц и чувствительностью 10^{-20} Вт/м², другой предназначен для измерения параметров Стокса приходящего излучения, его чувствительность 10^{-19} Вт/м². Система "Обзор" является аддитивной и может наращиваться постепенно. Предполагается, что к 1990 г. начнется наблюдение с 20 лучами, а к 1995 г. число лучей будет доведено до 100.

А.В. Архипов (Радиоастрономический институт АН УССР) рассмотрел вопрос о стратегии поиска ВЦ, основанной на обнаружении ее внутренних сигналов (аналогичных земному телевидению) в диапазоне 10^2 — 10^3 МГц. Полагая, что полная мощность, которой располагает ВЦ, составляет $\sim 10^{25}$ Вт и на радиоизлучение в диапазоне 10^2 — 10^3 МГц тратится такая же доля полной мощности, как и на Земле, он получил оценку мощности излучения ВЦ в данном диапазоне: $\sim 4 \cdot 10^{19}$ Вт. На расстоянии 20 пк (предельное расстояние использованного им звездного каталога) это дает спектральную плотность потока 1 Ян. Полагая, что "промышленная зона" ВЦ удалена (из экологических соображений) на расстояние 10^3 а.е. от звезды, он заключил, что такие зоны могли бы наблюдаться как слабые ($F_v \approx 1$ Ян) радиоисточники, удаленные на расстояния порядка одной минуты от близких звезд солнечного типа. А.В. Архипов проанализировал каталог близких ($R < 20$ пк) звезд и каталог радиоисточников на частоте 408 МГц и нашел четыре случая попадания источника в заданную окрестность звезд спектрального класса F8 V—K0 V. Вероятность случайной проекции, согласно его оценкам, составляет $2 \cdot 10^{-4}$. Подобные объекты могут представлять интерес для программы SETI [116].

В 1980—1981 гг. в НИРФИ была проведена радиолокация точек Лагранжа L_4 , L_5 в системе Земля—Луна с целью поиска зондов ВЦ в окрестности этих точек [117]. Наблюдения проводились на частоте 9,3 МГц в ночное время — через 3 ч после захода Солнца и за 3 ч до его восхода. Радиосигналы формировались в виде импульсов длительностью 1 с, разделенных промежутком в 4 с, эффективная мощность составляла 25 МВт. Прием ответных сигналов проводился в полосе 1,5 кГц с постоянной времени 0,2 с. Длительность одного сеанса, определяемая временем прохождения либрационной точки через диаграмму антенны, составляла 40 мин. Всего было проведено 25 сеансов. Не обнаружено никаких следов отраженного сигнала, вдвое превышающего уровень фона.

У.Н. Закиров продолжал разработку вопросов теории межзвездных релятивистских полетов. Им совместно с М.Я. Маровым предложен

проект посылки космического зонда к ближайшим звездам [118]. Проблемы теории релятивистских полетов обобщены им в монографии [119]. В.Г. Сурдин проанализировал возможности применения гравитационного маневра для межзвездных сообщений с использованием одиночных и кратных звезд различных типов. Согласно его данным, наилучшие условия для использования гравитационного маневра реализуются в ядрах шаровых скоплений [120].

В Институте кибернетики АН УССР продолжалась разработка проблемы контакта между различными высокоорганизованными системами (И.М. Крейн, О.А. Чукреева [121—123]). Системный подход к проблеме ВЦ разрабатывался Л.В. Лесковым [124, 125].

М.Д. Нусинов и С.В. Лысенко проанализировали физические условия, необходимые для самопроизвольного возникновения примитивных форм жизни и их последующего выживания на Земле и в Космосе [126, 127]. Л.С. Марочник и Л.М. Мухин рассмотрели вопрос о возможном числе и времени жизни технологических цивилизаций в Галактике, исходя из развиваемых ими представлений о том, что жизнь возникает в узкой кольцевой зоне Галактики (вблизи круга коротации), включающей галактическую орбиту Солнца, а время жизни цивилизаций определяется временем движения звезды по галактической орбите между соседними спиральными рукавами [128]. Философские и методологические проблемы поиска внеземных цивилизаций подробно анализируются в монографии В.В. Рубцова и А.Д. Урсула [98].

В мае—июне 1982 г. в САО АН СССР состоялось совещание рабочей группы Научного совета по радиоастрономии АН СССР по проблеме поиска внесолнечных планетных систем. Вопросы SETI рассматривались на Всесоюзной научно-технической конференции "Проблемы развития космической связи" (Калуга, 27—29 сентября 1983 г.). Философские аспекты проблемы обсуждались на ежегодных Чтениях К.Э. Циолковского в Калуге (1982—1985 гг.) и на симпозиуме в Вильнюсе (1987 г.).

7.6. ИТОГИ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Каковы же результаты 25-летней деятельности в области SETI в СССР? Отметим прежде всего, что для такой фундаментальной проблемы, как установление контакта с ВЦ, этот срок нельзя считать значительным, скорее он ничтожно мал. За прошедшие годы сформулирована задача исследований, очерчен более или менее точно круг проблем, наметились основные направления исследований. Было выполнено несколько экспериментальных работ по поиску сигналов в радио- и оптическом диапазонах, исследованы характеристики некоторых пекулярных объектов с целью проверки их возможной искусственной природы. Данные экспериментов, выполненных советскими учеными за эти годы, приведены в табл. 7.1. Надо ясно отдавать себе отчет в том, что все эти эксперименты (как и эксперименты, выполненные в других странах) по сути являются предварительными исследованиями по поиску наиболее эффективных

Таблица 7.1 Экспериментальные работы советских ученых по поиску внеземных цивилизаций

Годы наблюдений	Участники эксперимента	Место наблюдения	Размер телескопа	Объект наблюдений
1	2	3	4	5
1964—1965	Кардашев, Шоломицкий	Крым, Центр дальней космической связи (ЦДКС)	Восемь 16-метровых зеркал	2 квазара: СТА-21, СТА-102
1968—1969	Троицкий, Герштейн, Стародубцев, Рахлин	Радиоастрономическая станция НИРФИ, Зименки Горьковской обл.	15 м	11 звезд солнечного типа и галактика М 31
1969—1983	Троицкий, Бондарь, Стародубцев и др.	Сеть наблюдательных пунктов НИРФИ: Пустынь, Зименки, Пурех, Васильсурск (Горьковская обл.); Карадаг (Крым); Тулома (Мурманская обл.); Уссурийск (Приморский край)	Прием на дипольные антенны	Поиск спорадических импульсов со всего неба
1970—1972	Слыш, Пашенко, Лехт, Рудницкий и др.	Нансе (Франция)	40×240 м	Мазерные источники ОН: W 3, W 49, NGC 6334 A, Sgr B2, VY Б. Пса
1970—1972	Слыш	Нансе (Франция)	40×240 м	10 самых близких звезд
1972	Кардашев, Попов, Согласнов, Резников	РТ-22, КраО	22 м	Центр Галактики
1972—1974	Кардашев, Гиндилис, Попов, Согласнов, Спангенберг, Стейнбек и др.	Сеть наблюдательных пунктов ИКИ АН СССР: Кавказ—Памир, Кавказ—Камчатка, Кавказ—Камчатка—АМС "Марс-7"	Прием на всенаправленные антенны	Поиск импульсных сигналов со всего неба
1973—1974	Шварцман, Царевский, Мансуров, Демчук, Евсеев, Бескин, Пустыльник Л., Нестеренко, Якушев	САО АН СССР	0,6 (Цейс-600)	Пекулярные объекты: рентгеновские источники, звезды типа ТТав, радиообъекты с чисто непрерывным оптическим спектром (РОКОСы)

Характер эксперимента и параметры приемной аппаратуры	Литература
6	7

Проверка гипотезы об искусственной природе СТА-21, СТА-102 [28—30]
(поиск переменности). Частота 923 МГц; полоса 10 МГц; чувствительность 0,2—0,5 Ян по уровню 5 σ . Период наблюдений 450 сут, 209 записей, полное время наблюдений 80 ч

Параллельно-последовательный анализ спектра. Диапазон частот [18]
926—928 МГц. Полоса 2 МГц последовательно просматривается
20 фильтрами шириной по 100 кГц; полоса 100 кГц перекрывается
25 узкополосными фильтрами ($\Delta f = 13$ Гц), разнесенными по частоте на 4 кГц; непрерывный просмотр полосы 100 кГц осуществляется изменением частоты узкополосных фильтров. Время анализа полосы 2 МГц составляет 10 мин. Полное время наблюдений (для всех объектов) около 12 ч. Чувствительность $2 \cdot 10^{-21}$ Вт/м²

Одновременные наблюдения в двух пунктах и более. Диапазон [22—26, 57]
волн: 50, 30, 16, 8, 3 см; чувствительность 10^4 Ян. В июле—августе 1972 г., помимо пунктов на территории СССР, наблюдения проводились также в экваториальных водах Атлантического океана с борта НИС "Академик Курчатов". Начиная с середины 70-х годов наблюдения проводятся только в одном пункте: Крым, Карадаг. Продолжительность наблюдений: в среднем 1200 ч в год

Исследование статистической структуры сигнала мазерных источников ОН. Частота 1665, 1667 МГц. Спектральное разрешение [35, 60, 61]
4 кГц, 2 кГц. Общее время наблюдений ~ 2 ч

Наблюдения на частоте 1667 МГц в промежутках между выполнением основной программы по исследованию источников ОН [101, с. 172—173]

Анализ флуктуаций интенсивности непрерывного спектра излучения центра Галактики на волне 3,5 см с целью исследования статистической структуры сигнала [62]

Одновременные наблюдения в двух пунктах и более. Диапазон частот: 350—550 МГц (Кавказ—Памир, 1972); 350—550, $60 \pm 0,4$; 130] $38 \pm 0,4$ МГц (Кавказ—Камчатка, 1973—1974); 60, 38, 30 МГц (Кавказ—Камчатка—АМС "Марс-7", 1974). В метровом диапазоне использовались одноканальные приемники; в дециметровом — приемники с 4 каналами ($\Delta f = 5$ МГц) на частотах 371,5; 408; 458,5; 535 МГц для измерения дисперсии импульсов при распространении в межзвездной среде. Чувствительность $7 \cdot 10^{-15}$ — $2 \cdot 10^{-16}$ Вт/м². Продолжительность одновременных наблюдений 150 ч. Эксперимент на АМС "Марс-7" проводился совместно с французскими учеными

Поиск в оптическом диапазоне коротких импульсов длительностью 10^{-7} — 10^{-8} с, а также узких лазерных линий $\Delta \lambda < 10^{-6}$ Å с помощью аппаратурного комплекса МАНИА [69—75]

Таблица 7.1(окончание)

1	2	3	4	5
С 1978 г. по настоящее время	Шварцман, Бескин, Плахотченко и др.	САО АН СССР	6 м (БТА)	РОКОСы, другие пекулярные объекты, солнцеподобные звезды
1978	Маковецкий и др.	Зеленчукская, РА ТАН-600	7,4×450 м (отражающая поверхность одного рабочего сектора)	Звезда Летящая Барнадра
1980—1981	Сучкин, Токарев и др.	НИРФИ		Точки Лагранжа L_4 , L_5 в системе Земля—Луна

методов SETI. В ходе их выполнения проверяются отдельные рабочие гипотезы, уточняется сама постановка проблемы, намечаются новые направления. Главное, что теперь проблема SETI прочно стоит на фундаменте естественнонаучных знаний, опирается на наблюдения и опыт. Вместе с тем более четко проявились и яснее осознаны трудности на пути решения этой сложной, многогранной проблемы.

В первые годы становления проблемы CETI/SETI поиск сигналов ВЦ осуществляется только в США и СССР. Позднее география поисков существенно расширилась, эксперименты проводились в Австралии, Канаде, ФРГ, Франции, Нидерландах. Всего, начиная с проекта "Озма", во всем мире выполнено более 50 экспериментов. В США основное внимание уделялось поиску предельно узкополосных сигналов от звезд солнечного типа (особняком стоит Огайский SETI-обзор в линии 21 см). С этой целью, как уже отмечалось в разд. 7.1, в США были разработаны межканальные спектроанализаторы, работающие в реальном времени. В СССР это направление, начатое работами В.С. Троицкого, в дальнейшем не получило развития. Уделялось значительное внимание анализу отдельных пекулярных источников (СТА-102, исследование статистической структуры мазерных источников), а также поиску спорадического излучения (в том числе импульсных позывных ВЦ) с ненаправленными антеннами.

Приблизительно со второй половины 70-х годов стало проявляться отставание СССР от США и некоторых других стран в области поиска сигналов ВЦ, за исключением поисков в оптическом диапазоне. В чем причина отставания? Часто в этой связи ссылаются на отставание в оснащении наших радиоастрономических учреждений. Думается, что это лишь одна сторона проблемы; другая, на наш взгляд, кроется в определенных организационных и психологических затруднениях. Психологические затруднения хорошо известны. Они связаны с профессиональной незаинтересованностью радиоастрономов в отношении задач SETI. Сказывается и разочарование,

То же

[89, с. 124—125]

Проверка гипотезы П.В. Маковецкого о синхронизации посылки [67]
сигналов по вспышке Новой Лебеда в 1975 г. [65]

Радиолокация точек Лагранжа L_4 , L_5 в системе Земля—Луна [117]
с целью поиска зондов ВЦ в окрестности либрационных точек.
Наблюдения проводились на частоте 9,3 МГц. Эффективная
мощность 25 МВт. Проведено 25 сеансов длительностью по 40 мин

вызванное отсутствием ощутимых результатов поиска. Независимо от того, что оно не имеет под собой убедительных оснований (так как исследования, по существу, только начались), психологическое воздействие его ощутимо. В этих условиях особое значение приобретает организационное обеспечение исследований. Повидимому, следовало бы создать в нескольких научно-исследовательских организациях структурные подразделения, специально ориентированные на SETI. Такая рекомендация содержалась в решении Первого всесоюзного совещания по ВЦ (Бюракан, 1964), но она не была реализована. Создание секции "Поиски космических сигналов искусственного происхождения" при Научном совете по радиоастрономии АН СССР не решило (и не могло решить) эту задачу, ибо по своему статусу секция призвана координировать исследования в области SETI, проводимые в различных научно-исследовательских организациях, и не может заменить эти организации, не может вести самостоятельную исследовательскую работу.

За прошедшие годы в ряде организаций по инициативе отдельных ученых ставились и включались в план темы, связанные с SETI, но они всегда расценивались как второстепенные по сравнению с основной тематикой этих учреждений. Во многих случаях работы в области SETI проводились как внеплановые, и отчеты по ним часто не засчитывались при оценке работы подразделения или отдельных ученых. При таких обстоятельствах очень сложно привлечь к исследованиям научную молодежь. Многие молодые люди, студенты и выпускники университетов и вузов, интересовавшиеся проблемой SETI, вынуждены были искать себе другие задачи, так как занятие SETI не давало им ни прочного положения, ни перспективы в будущем. Создалась ситуация, при которой только очень авторитетные ученые могли позволить себе ставить и проводить эксперименты в области SETI, но и они не имели возможности привлечь к этим работам свежие, молодые силы. В таких условиях ни одно научное направление не может плодотворно развиваться.

Представляется, что без организационной перестройки трудно ожидать существенных успехов в области SETI.

Каковы же перспективы на ближайшие годы? В плане поиска сигналов ВЦ новые возможности откроются с введением в строй системы "Обзор" (см. разд. 7.5). Она не только значительно повысит чувствительность при поиске сигналов со всего неба (по сравнению с ненаправленными антеннами), но и позволит более уверенно выделять различные типы сигналов (земные помехи, ИСЗ, ионосфера, Солнце и др.). Определенные перспективы связаны также с вводом радиотелескопа РТ-70 ИКИ АН СССР, строительство которого ведется в высокогорном районе Узбекистана [129]. Этот крупный полноповоротный радиотелескоп диаметром 70 м, рассчитанный на работу в миллиметровом диапазоне волн, вплоть до 1 мм, позволит проводить широкую программу поиска в различных спектральных линиях, в том числе в линии позитрония 1,47 мм. Существенные перспективы открываются с развитием космической радиоастрономии (создание крупных орбитальных радиотелескопов) [130]. Таким образом, если будут решены организационные трудности, о которых говорилось выше, исследования в области SETI в нашей стране могут существенно продвинуться вперед.

Вместе с тем не следует сводить все только к поиску радиосигналов. Необходимо серьезное осмысление проблемы. Как показал приобретенный опыт, надо развивать самый широкий подход к проблеме ВЦ, привлекать широкий круг специалистов, проводить поиск в самых различных направлениях. Необходимо сочетание глубоких теоретических разработок с экспериментальными исследованиями, в ходе которых следует постоянно уточнять и совершенствовать программу научно-исследовательских работ в области SETI. Поиски ВЦ не являются отвлеченной проблемой, оторванной от нужд человечества, они тесно связаны с историей нашей земной цивилизации, с развитием ее науки и культуры. Они помогают лучше представить и если не решить, то по крайней мере осознать наиболее важные проблемы, стоящие перед нашей земной цивилизацией.

Глава 8

ПРИКЛАДНАЯ РАДИОАСТРОНОМИЯ

Прикладная радиоастрономия — область радиоастрономии, использующая ее результаты и методы для практики, возникла в нашей стране фактически одновременно с возникновением радиоастрономии как науки.

Первые шаги прикладной радиоастрономии связаны с именами Н.Д. Папалекси, С.Э. Хайкина, Г.С. Горелика, М.Т. Греховой, В.В. Виткевича, В.С. Троицкого, Б.М. Чихачева и с организацией радиоастрономических центров в Крыму (Симеиз), под Горьким (Зименки), под Ленинградом (Пулково) и под Москвой (в районе Серпухова) [1].

На этих первых в стране радиоастрономических обсерваториях наряду с астрофизическими начались и прикладные исследования с использованием методов и аппаратуры радиоастрономии, в первую очередь для изучения распространения радиоволн в атмосфере Земли. Если рассматривать радиофизику как "радио для физики и физику для радио" [2], то несколько условно можно сказать, что первые астрономические результаты экспериментальной радиоастрономии — это было "радио" для физики" (в данном случае для астрофизики), в то время как использование методов радиоастрономии в смежных отраслях — прикладная радиоастрономия — это была своего рода "физика для радио".

К настоящему времени используются как непосредственно результаты радиоастрономических исследований, так и развитые в радиоастрономии методы и аппаратура. В частности, результаты исследований Солнца, Луны и других источников космического радиоизлучения используются в антенной технике, навигации, радиометеорологии. Развитые в радиоастрономии методы исследования характеристик объектов по их собственному тепловому радиоизлучению нашли применение в исследовании земной атмосферы, радиометеорологии и медицине. Радиоастрономическая аппаратура и методы радиоинтерферометрии нашли применение в геофизике, геодезии и службе времени.

Ниже мы попытаемся кратко охарактеризовать методы и результаты практического применения отечественной радиоастрономии. Подробнее об этом можно узнать из монографий и обзоров [1, 3—10].

8.1. ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ СОЛНЦА НА ЗЕМЛЮ И ОКОЛОЗЕМНОЕ ПРОСТРАНСТВО

Принимая радиоизлучение Солнца и наблюдая за его активностью, в какой-то степени можно прогнозировать последствия ее влияния на Земле и в околоземном пространстве (так называемые солнечно-земные связи). Последнее приходится учитывать при полетах космонавтов в связи с возможной радиационной опасностью при повышенной солнечной активности. Еще за полтора десятилетия до первых пилотируемых полетов были организованы сначала эпизодические, а затем регулярные и непрерывные наблюдения за радиоизлучением Солнца на различных длинах волн — от сантиметровых до декаметровых — так называемая радиослужба Солнца. Центральной организацией "радиослужбы Солнца" в нашей стране является Радиоастрономическая обсерватория "Зименки" НИРФИ, регулярно выпускающая специальный бюллетень "Радиоизлучение Солнца". Регулярные наблюдения в системе "радиослужбы Солнца", кроме НИРФИ, проводятся в Главной астрономической обсерватории АН СССР, Крымской астрономической обсерватории АН СССР, Астрономической обсерватории АН Латвийской ССР, Абастуманской астрофизической обсерватории АН Грузинской ССР, ИЗМИРАН СССР, Кисловодской горной станции и Уссурийской горно-таежной станции АН СССР.

В области солнечно-земных связей выделяют два направления ис-

следований: первое, связанное с разработкой методов прогноза и диагноза солнечных геоэффективных явлений, и второе, направленное на изучение связей между физическими процессами на Солнце, в земном и околоземном пространстве.

Проблема прогнозирования солнечных вспышек по своей сложности и значимости сравнима с фундаментальными физическими проблемами. Ее решение в научных программах развитых стран стоит наряду с решением энергетических и экологических проблем. Существующие в настоящее время многочисленные прогностические схемы базируются в основном на богатом эмпирическом материале, в том числе и на полученном в радиодиапазоне, однако пока эти схемы не позволяют достичь степени оправдываемости выше 70—80%. Существенную роль в прогрессе прогнозирования солнечных вспышек может сыграть развитие физически обоснованных методов прогноза, основанных на знании моделей активных областей и динамики предвспышечных процессов. Наиболее перспективным при этом представляется изучение процессов возникновения и развития неустойчивостей, находящихся отражение во флуктуационных характеристиках излучения.

Проводимое в Горьковском НИРФИ изучение флуктуационных процессов на Солнце в радиодиапазоне привело к обнаружению эффекта возрастания амплитуды долгопериодных ($T \geq 20$ мин) пульсаций микроволнового радиоизлучения Солнца перед протонными вспышками [11]. Исследование этого эффекта позволяет надеяться на создание метода краткосрочного прогноза мощных солнечных вспышек на основе наблюдений слабых временных вариаций солнечного радиоизлучения.

Необходимо отметить, что изучение долгопериодных пульсаций в радиодиапазоне в прогностических целях является одним из перспективных направлений.

В последнее время появляется все больше исследований тонкоструктурных образований в непрерывном спектре сантиметрового радиоизлучения Солнца как показателя развития активных областей в предвспышечный период.

Во втором направлении исследований в области солнечно-земных связей отметим обнаружение корреляционной зависимости между пульсациями солнечного радиоизлучения и колебаниями магнитного поля Земли (МПЗ) в предвспышечные периоды [12], позволяющее надеяться на использование пульсаций МПЗ как возможного параметра при прогнозировании протонных вспышек.

Исследования возможностей диагностики протонных событий по наблюдениям всплесков ведутся в НИИФЛГУ и ИЗМИРАНе. В частности, в ИЗМИРАНе разработана методика количественного прогнозирования протонных событий на основе многолетних исследований динамических спектров всплесков. В прогнозе появления всплесков существенную роль играют наблюдения радиоизлучения Солнца с высоким разрешением, проводимые в ГАО АН СССР на Большом Пулковском радиотелескопе (БПР) и РАТАН-600.

8.2. ИССЛЕДОВАНИЕ ЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЫ РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

Характеристики атмосферы (тропосферы, стратосферы и ионосферы) Земли имеют существенное значение для радиосвязи, радиолокации, радионавигации, физики атмосферы, метеорологии и т.д.

Одним из эффективных методов изучения условий распространения радиоволн в атмосфере является использование радиоизлучения Солнца, Луны и других космических источников. Поскольку Солнце является мощным генератором радиоизлучения, расположенным вне земной атмосферы и видимым с Земли под различными углами в зависимости от времени суток, то, принимая это радиоизлучение, например на восходе или заходе, можно измерить рефракцию, т.е. искривление лучей в атмосфере. Учет рефракции, достигающей десятков угловых минут вблизи горизонта, чрезвычайно важен для практики, в частности при решении конкретных задач радиолокации и радионавигации. По результатам этих же измерений можно определить и поглощение радиоволн в атмосфере, так как при разных углах наблюдения радиоизлучение проходит слои атмосферы, имеющие разную толщину, и, следовательно, по-разному ослабляется. Измерение "видимых" угловых размеров Солнца может позволить определить и рассеяние в атмосфере. Сказанное при достаточной чувствительности приемной аппаратуры может быть достигнуто и с использованием других, более слабых внеземных источников (эти измерения были выполнены в ФИАНе и в Горьком 1948—1954 гг. [1]).

Радиоастрономия позволила использовать и другой способ определения поглощения в нижней части атмосферы — в тропосфере, примененный сначала (1945 г.) в Массачусеттском технологическом институте Р. Дике и его сотрудниками, а затем (начиная с 1948 г.) и в нашей стране [1].

Способ основан на измерении собственного теплового радиоизлучения тропосферы. Сущность его заключается в следующем [13]. Тепловое радиоизлучение тропосферы однозначно связано с ее поглощением, определяется для безоблачной атмосферы в основном молекулами кислорода O_2 и водяного пара H_2O . Это поглощение носит резонансный характер (резонансные частоты кислорода соответствуют диапазону миллиметровых волн вблизи значения 0,5 см, а водяного пара — также в диапазоне миллиметровых волн и вблизи волны 1,35 см) и, естественно, тем больше, чем больше концентрация O_2 и H_2O и чем большая толща атмосферы участвует в поглощении. Когда радиоизлучение атмосферы принимается антенной, направленной в зенит, оно определяется эффективной высотой поглощающей атмосферы $H_{O_2} \approx 5$ км для O_2 и $H_{H_2O} \approx 2,5$ км для H_2O . В тех же случаях, когда главный луч диаграммы направленности антенны находится под углом к горизонту ϑ , он пронизывает большую толщину тропосферы, определяемую как $H \cos \vartheta$. До углов порядка $7-5^\circ$ к горизонту сохраняется прямая зависимость интенсивности принимаемого радиоизлучения от $\cos \vartheta$, и по ее наклону можно судить о величине поглощения.

Поскольку поглощение в водяном паре пропорционально абсолютной влажности p , то, строя зависимость измеренных величин поглоще-

ния от абсолютной влажности и экстраполируя эту прямую к нулевой влажности, можно определить поглощение в кислороде (при $\rho=0$), а по наклону прямой — поглощение в водяном паре [13].

Наиболее интенсивно радиоастрономические методы исследования условий распространения радиоволн в атмосфере развивались и использовались в нашей стране. В 1951—1952 г. в г. Горьком [13] впервые были разработаны методы раздельного измерения поглощения в кислороде и водяном паре атмосферы и измерено радиоизлучение тропосферы на волнах 3 и 10 см, в 1956 г. в ФИАНе СССР впервые измерили поглощение раздельно в кислороде и водяном паре в миллиметровом диапазоне на волне 8 мм [14], а в 1960 г. — в НИРФИ на волне $\lambda = 4$ мм [15].

Следует особо отметить исследования эффективных высот и линий поглощения малых атмосферных составляющих, проведенные в г. Горьком [16, 17], и исследования атмосферы в субмиллиметровом диапазоне радиоволн с баллонов (высотных аэростатов) и спутников, выполненные в ФИАНе. На волнах 0,1 и 0,3—0,8 мм были впервые получены систематические данные об излучении атмосферы Земли, снята карта Земли и установлена связь распределения яркостной температуры субмиллиметрового излучения и динамики активных областей в тропосфере и стратосфере Земли [1, 18, 19].

К настоящему времени благодаря применению указанных методов получены обширные данные о поглощении в безоблачной тропосфере волн от миллиметрового до метрового диапазона [10, 17].

Измерения радиоизлучения облачной атмосферы и радиоизлучения дождя позволяют получить данные о средней водности и эффективной температуре облаков, а также об интенсивности дождя и о полном поглощении на наклонных трассах [20, 21]. При этом часто необходимо проводить совместные радиометрические и радиолокационные СВЧ-измерения. В этих исследованиях существенная роль принадлежит ИРЭ АН СССР. Здесь успешно проведены совместно радиотепловые и радиолокационные измерения метеопараметров облаков и дождя (см. например, [22, 23]).

Значительно расширяются возможности радиометрических исследований тропосферы при наблюдениях с самолетов и ИСЗ [18, 19]. Эти исследования, по существу, смыкаются с пассивной радиолокацией. И в этих исследованиях весьма важные результаты получены в ИРЭ АН СССР. В результате совместных работ ИРЭ, ИФА АН СССР и промышленных организаций на ИСЗ "Космос-243", запущенном в 1968 г., впервые в мире была установлена радиометрическая аппаратура. В 1970 г. эксперимент был повторен на спутнике "Космос-384" (в США аналогичный эксперимент был проведен лишь в 1972 г. на спутнике "Нимбус-5"). В результате измерения радиотеплового излучения земных покровов и атмосферы в миллиметровом и сантиметровом диапазонах волн были получены данные о распределении температуры по поверхности океана, распределении зон осадков и запасе воды в облаках, распределении штормовых районов и степени волнения поверхности океана, сплоченности льдов вблизи полярных областей и т.д. [24, 25].

В ИРЭ АН СССР используются также самолеты-лаборатории для исследования собственного излучения земных покровов в диапазоне волн 0,8—60 см, в частности для сбора данных о состоянии влажности почвы на конкретных сельскохозяйственных угодьях, а также, например, для определения солености открытых бассейнов в Средней Азии и Крымской области.

Весьма перспективны радиометрические методы измерений с самолетов для контроля и картографирования лесных пожаров [26]. Необходимо отметить исследования, проведенные в ГАО и САО АН СССР, относящиеся к влиянию фазовых флуктуаций, обусловленных нестабильностью тропосферы, на характеристики антенн, влиянию атмосферы на работу интерферометров со сверхдлинной базой, а также исследование характеристик флуктуаций радиоизлучения облачной и безоблачной атмосферы и разработку методов подавления помех, обусловленных этими флуктуациями (см., например, [27—30]).

Что касается ионосферы Земли, то ее исследование радиоастрономическими методами позволило определить поглощение, рефракцию и полную электронную концентрацию на луче зрения в этой части атмосферы. В этой области существенные результаты получены в НИРФИ, ФИАН СССР, ИРЭ АН УССР.

Дискретные источники космического радиоизлучения позволяют путем интерферометрических наблюдений за источником по измерениям кажущегося смещения источника определять рефракцию в ионосфере, вызванную регулярным изменением в пространстве электронной концентрации N_e и крупномасштабными неоднородностями ионосферной плазмы, а также следить за крупномасштабными изменениями регулярных и хаотических градиентов в ионосфере по изменению во времени характерных периодов интерференционной картины, записанной на выходе интерферометра. По размыванию (в среднем) этой картины, вызванному неоднородностями сравнительно малых масштабов (размером $l \leq d$, где d — расстояние между антеннами интерферометра), можно измерять при наличии интерферометров с разными базами спектральные характеристики неоднородностей. Рассеяние на ионосферных неоднородностях приводит к тому, что в точку приема излучение от источника приходит различными путями (статистическая многолучевость). В результате интерференции различных мод возникают пространственные вариации интенсивности принимаемого от источника излучения, а при эффективном движении ионосферных неоднородностей относительно луча зрения на источник возникают временные флуктуации сигнала ("мерцание радиоисточника"). Характер этих флуктуаций различен на разных несущих радиочастотах, поэтому широкополосность излучения космических радиоисточников используется для изучения параметров неоднородностей ионосферы. Пространственно-разнесенный прием используется для изучения движений в ионосфере.

Радиоастрономические методы исследования ионосферы и ее нерегулярной структуры внесли в 50-х годах значительный вклад в наше понимание происходящих в ионосфере физических процессов и

с успехом используются в настоящее время, например при изучении эффектов воздействия мощного радиоизлучения на ионосферу.

В ФИАНе СССР наиболее интенсивно работы по исследованию ионосферы проводились в период с 1951 по 1969 г. на Крымской научной станции ФИАНа (подробнее см., например, [31]). С 1951 г. проводились исследования неоднородностей структуры ионосферы с помощью "просвечивания" ее излучением Кассиопеи А, Лебеда А и Тельца А. Были детально исследованы размеры, форма и движение неоднородностей с характерными размерами порядка нескольких километров, их суточный и сезонный ходы. Эти работы были выполнены методом пространственно-разнесенного приема сигналов от радиоисточников Кассиопея А, Лебедь А, Дева А с помощью трехантенного радиоинтерферометра.

Другой большой цикл работ, продолжавшийся до 1969 г., был посвящен исследованию крупномасштабной структуры ионосферы. Основным методом исследований были измерения различных составляющих рефракции радиоволн от внеземных источников в ионосфере также с помощью интерферометров. В результате этих работ были измерены величины нерегулярной рефракции радиоволн в ионосфере, найдены их зависимости от зенитного угла, времени суток и года, от направления прихода лучей относительно стран света, их связь с активностью Солнца [31].

В НИРФИ радиоастрономические методы используются в ионосферных исследованиях начиная с 1959 г. Был существенно развит метод и проведены обширные радиометрические исследования поглощения радиоволн в ионосфере на умеренных и высоких широтах и получены данные об электронной концентрации и эффективном коэффициенте рекомбинации в нижней ионосфере (слой D) в условиях спокойной ионосферы, в периоды солнечных затмений, солнечных вспышек, а также в условиях возмущенной ионосферы авроральных широт [32]. С помощью измерений флуктуаций интенсивности и углов прихода радиоизлучения дискретных источников (Лебедь А и Кассиопея А) были получены сведения о параметрах неоднородностей F -слоя ионосферы умеренных и авроральных широт (в различных геофизических условиях) в диапазоне масштабов от сотен метров до десятков—сотен километров. При этом с помощью многочастотного приема была впервые проанализирована структура дифракционной картины от дискретного источника на поверхности Земли, ее селективные свойства, что позволило, во-первых, показать наличие в ионосфере широкого спектра масштабов (степенной спектр флуктуаций концентрации) неоднородностей, исследовать фокусирующие свойства ионосферных неоднородностей, а во-вторых, изучить поведение частотной корреляции флуктуаций, обусловленных неоднородностями малых ($l \leq 1$ км) масштабов, и показать, что в частотной корреляции содержится информация о крупномасштабных структурах среды [33]. Эти свойства частотной корреляции впоследствии были использованы при изучении неоднородной структуры межзвездной плазмы.

После начала исследований эффектов воздействия мощным радиоизлучением на ионосферу радиоастрономический метод был с успехом

применен для исследования искусственной ионосферной турбулентности. С его помощью (прием излучения источника на высоконаправленную антенну и интерферометр) были обнаружены мелкомасштабные ($l \leq 20$ м) искусственные неоднородности ионосферы, а также получены сведения об искусственной турбулентности с $l \geq 0,3 \div 1$ км [34].

Для определения электронной концентрации в ионосфере в НИРФИ было предложено [35] использовать открытое В.А. Разиным [36] явление поляризации космического радиоизлучения. Радиоастрономический поляризационно-фарадеевский метод [35] позволяет определить полное электронное содержание на луче зрения в ионосфере $N_{\parallel}$ по фарадеевскому вращению плоскости поляризации линейно-поляризованного радиоизлучения областей Галактики. Первые измерения этим методом были выполнены на РАС НИРФИ "Старая Пустынь" в 1970 г., и с 1976 г. эти измерения ведутся регулярно. Начиная с 1984 г. такие измерения стали проводиться в г. Ашхабаде (Физ.-техн. ин-т АН ТССР) и в г. Мурманске (Полярный геофиз. ин-т Кол. фил. АН СССР).

По сравнению со спутниковыми методами определения электронного содержания радиоастрономический метод обладает рядом преимуществ. Исключение из схемы эксперимента спутника позволяет существенно удешевить измерения и проводить их из любого пункта на поверхности Земли. Последнее особенно существенно для полярных широт. Дело в том, что для высоких широт геостационарный спутник находится вблизи горизонта. Поэтому для изучения временных вариаций электронного содержания в полярной ионосфере спутниковые методы становятся затруднительными, а радиоастрономический метод приобретает особую ценность. Проведенные в НИРФИ исследования поляризации галактического радиоизлучения в широком диапазоне волн (0,18—3 м) позволили определить наиболее яркие в поляризованном радиоизлучении участки небосвода, пригодные для измерений полного электронного содержания ионосферы, и оптимальные для этой цели длины волн. Разработана методика этих измерений.

За почти десятилетний период наблюдений электронного содержания на РАС НИРФИ "Старая Пустынь" накоплен богатый экспериментальный материал, относящийся к различным фазам цикла солнечной активности. На базе этих данных, в частности, проводилось изучение явления ночного возрастания электронного содержания. Был получен сезонный ход вероятности появления этого возрастания, а также установлена связь этого явления с уровнем геомагнитной активности.

Многолетние наземные исследования радиоизлучения тропосферы привели к разработке методов дистанционного радиометрического определения высотных распределений температуры и водяного пара, общего влагосодержания тропосферы, высоты, толщины, температуры и водности облаков и созданию в последние годы в НИРФИ так называемого радиометеоскопа — комплекса радиотелескопов, способных принимать и измерять радиоизлучение тропосферы на ряде длин волн — от 1,6 мм до 1,35 см [37].

Существенным преимуществом радиометеоскопа является его всепогодность. Комбинирование метода, в основе которого лежит использование радиотелескопа, с оптическими, акустическими и радио-

локационными методами позволяет получить ряд новых ценных сведений о состоянии атмосферы в обширном регионе, например о количестве содержащегося в ней углекислого газа, загрязнении дымом, наличии вредных примесей и т.д. Таким образом, создается возможность применить радиоастрономические методы и приборы для целей охраны окружающей среды.

Расположение радиометеоскопов на спутниках Земли открывает реальные перспективы оперативного получения метеоданных в глобальном масштабе нашей планеты и тем самым существенного повышения точности прогнозирования погоды.

8.3. РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В НАВИГАЦИИ

Широко используется радиоастрономия в навигации. Давно известен оптический секстан — прибор для определения местоположения корабля или самолета по излучению звезд (в том числе Солнца), координаты которых известны. Но он, как и все оптические инструменты, действует лишь в безоблачную погоду. Достижения радиоастрономии позволили создать радиосекстан, основанный на приеме радиоизлучения Солнца. В отличие от оптического этот прибор является всепогодным, так как сантиметровые радиоволны практически свободно проходят через облака и дождь.

Радиосекстан по существу представляет собой небольшой радиотелескоп, состоящий из антенны и радиоприемной системы. Чтобы определить местоположение, например, корабля, луч антенны должен быть наведен на радиоисточник с заранее известными координатами. При этом необходимо точно знать расположение самого луча в пространстве (связь направления оси луча с координатной системой радиотелескопа).

В нашей стране впервые радиосекстаны разрабатывались в Ленинграде и в Горьком. Так, в 1950 г. в Ленинграде были разработаны основные принципы создания 3-сантиметрового солнечного "радиокompаса" [38], а на Горьковской радиоастрономической станции "Зименки" прототип радиосекстана работал уже в 1951 г. и представлял собой радиотелескоп с так называемым сканированием луча [1]. Сейчас широко используются как солнечные радиосекстаны, так и радиосекстанты, принимающие радиоизлучение дискретных источников — галактических и внегалактических источников радиоизлучения. Необходимость последних объясняется тем, что Солнце имеет сравнительно большие угловые размеры (около половины градуса), а центр его радиоизлучения не всегда совпадает с оптическим из-за наличия на диске активных областей. Поэтому приходится специально измерять положение центра тяжести радиоизлучения Солнца (ЦТР). Дискретные источники радиоизлучения имеют малые (единицы минут дуги) угловые размеры и поэтому позволяют реализовать большую точность определения местоположения радиосекстана. Тем не менее и солнечные радиосекстаны не утратили своего значения, а для фиксации ЦТР Солнца проводятся специальные наблюдения. Изучение смещения ЦТР Солнца было начато в 1956 г. на волне 3,2 см [39], и в настоящее время эти исследования продолжают.

3.4. РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ АНТЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Достижения антенной техники и радиолокации за последние несколько десятилетий связаны как с созданием крупных, точных, высокочувствительных многоцелевых антенных систем (в частности, апертурных антенн и фазированных антенных решеток), так и с разработкой новых принципов и методов приема и новых типов антенн.

Разработка, производство и эксплуатация все более сложных антенных систем требуют оперативного проведения соответствующих измерений их параметров, причем удельный вес этих измерений становится весьма существенным. Это приводит к тому, что все большее число специалистов используют в своей работе методы и технику антенных измерений.

Вполне естественно поэтому наблюдаемое в последнее десятилетие резкое повышение интереса не только к традиционным методам антенных измерений, использующим передатчики, установленные на вышках и летательных аппаратах, но и особенно к новым методам измерений, таким, как амплифазометрический (радиоголографический), коллиматорный, метод фокусировки, радиоастрономические методы [40—42]. Взаимовлияние и взаимодействие антенной техники и радиоастрономии весьма велико и плодотворно для их развития. В антенную технику все в большей степени проникают понятия, методы и аппаратура, связанные с радиоастрономией. Успехи радиоастрономии в значительной степени связаны с совершенствованием теории и техники антенн.

В то же время использование достижений радиоастрономии оказывается чрезвычайно полезным при создании новых антенных систем. Последнее определяется все возрастающей потребностью в приеме слабых сигналов (например, в антеннах, предназначенных для космической связи или для дальнего обнаружения), что приводит к новым критериям оптимальности антенн (например, к требованиям максимального отношения сигнала к шуму на выходе антенны). При этом приходится принимать во внимание шумы, вызванные радиоизлучением земли и атмосферы, внеземным радиоизлучением, что в случае приема сильных сигналов было несущественным. Многие из этих вопросов подробно исследованы в радиоастрономии, поскольку радиоастрономический эксперимент связан с приемом сигналов весьма малой величины. Разработанная для этой цели чувствительная радиоастрономическая аппаратура (радиометры — см. ниже) оказывается полезной при создании приемной аппаратуры вообще, а также и в процессе исследований характеристик антенн по внеземному радиоизлучению.

Этим же радиоастрономическим методам антенных измерений служит и эталонирование интенсивности внеземных источников (см. ниже), и развитие в процессе этого эталонирования методы прецизионных измерений, использующие первичные эталоны теплового радиоизлучения — "черные" диски.

Разработанные и применяемые в радиоастрономии новые типы антенных систем (например, системы апертурного синтеза) также находят применение в различных областях антенной техники. Радиоастрономические методы исследования антенн разработаны и широко используются в радиоастрономии и антенной технике. Использование

радиоастрономических методов часто требует сочетания как амплитудных, так и фазовых измерений (например, в корреляционных методах) и развития теории обработки сигналов и восстановления радиоизображений, что характерно для радиоастрономии.

Наконец, необходимо отметить, что радиоастрономические методы часто сочетаются с радиоголографическими, например при контроле деформаций поверхности зеркальных антенн. Наиболее очевидным применением радиоастрономических методов является юстировка (т.е. установление соответствия между направлением оси луча антенны и координатной системой) и измерение диаграммы направленности. Юстировка небольших антенн особых трудностей не представляет, для этого можно использовать, например, передатчик, расположенный на небольшой вышке. Но юстировка крупных (с диаметром в несколько десятков метров) антенн радиолокационных станций и систем космической связи является сложнейшей технической проблемой, так как источники радиоизлучения с известными параметрами должны располагаться на гигантских (сотни метров высотой) вышках или летательных аппаратах. Возникла мысль использовать для юстировки антенн и измерения их диаграмм направленности Солнце и дискретные источники. Именно этот способ впервые независимо был предложен в 1950 г. в нашей стране [38] и в 1953 г. в США [43].

В дальнейшем радиоастрономические методы антенных измерений активно развивались в Советском Союзе (см., например, [3—5]).

Юстировка антенн по радиоизлучению внеземного источника сводится к сопоставлению расчетного момента прохождения источника через направление максимума диаграммы направленности антенны (этот момент нетрудно рассчитать, зная координаты источника и местоположение антенны) с моментом приема антенной сигнала максимального уровня от указанного источника. Одновременно с юстировкой можно по радиоизлучению движущегося по небу источника (или меняя ориентацию антенны) измерить диаграмму направленности антенны, т.е. форму ее луча. Наиболее точно и до весьма малых уровней боковых лепестков можно измерить диаграмму направленности, используя радиоизлучение внеземного источника и корреляционный метод приема [40]. При этом, однако, необходима вспомогательная антенна с известными параметрами, "следящая" за внеземным источником. Корреляционный метод приема существенно повышает не только чувствительность, но и помехозащищенность (поскольку мешающие сигналы оказываются некоррелированными), а также позволяет достаточно точно восстанавливать амплитудно-фазовое распределение поля по поверхности раскрыва (АФР) фурье-сопряженное с комплексной диаграммой направленности. Зная АФР, можно восстанавливать и карту распределения деформаций поверхности, например зеркальной антенны, что весьма существенно для крупных антенн, работающих в коротковолновом диапазоне радиоволн (особенно на миллиметровых волнах). Корреляционный — это по существу радиоголографический (ампифазометрический) метод [40—43], использующий в качестве опорного сигнал со вспомогательной антенны. Разработан [44] также корреляционный радиоголографический метод измерения диаграммы направлен-

ности и АФР, в котором вместо вспомогательной антенны используется дополнительный облучатель, перемещаемый в фокальной плоскости исследуемой антенны.

Кроме юстировки и измерения диаграммы направленности, вземное радиоизлучение позволяет измерять эффективную площадь, коэффициент полезного действия (КПД) и другие параметры антенны. Коэффициент полезного действия измеряется по собственным шумам антенны. Этот метод был разработан в начале 50-х годов в Горьком и Ленинграде [45—47]. Метод основан на известном законе Кирхгофа о взаимной пропорциональности излучательной и поглощательной способностей тел. Антенна с потерями не только ослабляет внешний сигнал, но и излучает пропорционально своей температуре и коэффициенту поглощения. Направляя антенну в область неба со слабым радиоизлучением (например, в зенит), можно по величине выходного сигнала приемника, обусловленного в основном собственным радиоизлучением (шумами) антенны, много большим, чем внешнее излучение, определить потери (КПД) антенны. Коэффициент рассеяния и усиление можно измерять по собственному радиоизлучению покрытого поглощающим материалом "черного" диска, как это было предложено в 1960 г. в НИРФИ [48—50], а также по собственному радиоизлучению земной поверхности, в частности леса и среза почвы [51, 52], и по распределенному космическому радиоизлучению [53].

В настоящее время использование "черных" дисков и вземных источников радиоизлучения для калибровки антенн стало обычной и повседневной практикой, а достигаемая при этом экономия весьма существенна.

Для прецизионного измерения эффективной площади антенн по вземным источникам необходимо точно измерить, проэталонировать на волнах различной длины интенсивности радиоизлучения этих источников (см. разд. 8.5).

Важным приложением радиоастрономии является весьма точное измерение по вземным источникам параметров векторов баз интерферометров и их географического местоположения [54].

8.5. ЭТАЛОНИРОВАНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ ДИСКРЕТНЫХ ИСТОЧНИКОВ, ЛУНЫ И СОЛНЦА

Возможность и целесообразность использования вземных источников с известной интенсивностью излучения и точно известным положением на небесной сфере в качестве естественных проэталонированных генераторов шумового сигнала для калибровки различных радиотехнических систем очевидны. Однако реализация этой возможности связана с точным измерением интенсивности излучения этих источников. Точные (с погрешностью в несколько процентов) абсолютные измерения интенсивности излучения весьма трудны. Трудности связаны с малостью принимаемого сигнала от источника, необходимостью учета распределенного космического радиоизлучения в районе источника, попадающего в главный лепесток диаграммы направленности антенны, а также космического радиоизлучения и радиоизлуче-

ния земли и атмосферы, попадающих в боковые и задние лепестки диаграммы. Необходим также учет собственных шумов антенной и приемной систем и знание параметров антенны радиотелескопа (усиления, диаграммы направленности и др.).

Первые измерения потоков Кассиопеи А и Тельца А на волнах 3 и 10 см были проведены в г. Горьком в 1952 г. [47], однако систематические точные измерения начались лишь в начале 60-х годов, когда в НИРФИ был предложен прецизионный метод измерений — метод "черного" диска, или "искусственной Луны" [48—50]. Метод заключается в сравнении интенсивности принимаемого от исследуемого источника радиоизлучения с принимаемой "эталонной" интенсивностью радиоизлучения диска, покрытого поглощающим материалом. Поскольку яркостная температура радиоизлучения абсолютно поглощающего (на данной длине волны), т.е. "черного" материала, равна его термодинамической температуре, то, зная или измеряя температуру "черного" диска, равную температуре окружающей среды, и его угловые размеры, "видимые" из точки расположения антенны радиотелескопа, мы тем самым эталонируем интенсивность излучения этого диска с погрешностью, равной его коэффициенту отражения, составляющему для хорошо поглощающих материалов доли процента. Казалось бы, с такой же погрешностью возможно измерить путем сравнения и интенсивность излучения источника (напр., Солнца или Луны, в этих случаях удобно подбирать угловые размеры диска равными угловым размерам Солнца или Луны — отсюда название "искусственная Луна"). Однако при наблюдении "черного" диска приходится учитывать дифракцию на его краю, в результате которой принимается радиоизлучение не только диска, но и окружающего пространства, в частности поверхности земли, достаточно "черной" в радиодиапазоне.

На сантиметровых и дециметровых волнах яркостные температуры радиоизлучения атмосферы и космического радиоизлучения малы по сравнению с температурой диска и земли, поэтому важно исключить радиоизлучение земли, попадающее в дифракционную диаграмму системы антенна—диск. Для этого диск надо наблюдать под большими углами к горизонту (порядка $20\text{--}25^\circ$), т.е. располагать на мачте или использовать рельеф местности. Расстояние от антенны до диска должно быть достаточно большим, порядка $2D^2/\lambda$ (D — диаметр антенны, λ — длина волны), чтобы диск располагался в дальней зоне антенны, что упрощает расчеты. Поэтому, например, в экспериментах НИРФИ, проводимых на радиоастрономической станции в районе Карадага, диск устанавливали на вершине горы в полукилометре от радиотелескопа, а диаметр диска равнялся 5 м.

Возможен и другой способ измерений на расстояниях, в 10—20 раз меньших, однако при этом приходится фокусировать антенну радиотелескопа на диск [50]. Этим методом проводятся измерения на РАС НИРФИ "Старая Пустынь", где 1—2-метровые диски располагаются на 25-метровых вышках на расстояниях 50—100 м от антенн радиотелескопов.

Методом "черного" диска в НИРФИ были измерены с погрешностью в несколько процентов потоки радиоизлучения наиболее мощных диск-

ретных источников Кассиопеи А, Лебедя А, Тельца А и Девы А в диапазоне волн 3—100 см (см., например, [55—59]). В настоящее время составлены весьма точные каталоги спектров интенсивностей упомянутых источников. Эти каталоги общепризнаны как наиболее точные в мире и используются в качестве опорных при составлении каталогов для более слабых источников как в нашей стране, так и за рубежом. На основе абсолютных измерений в НИРФИ предложена и разработана новая радиоастрономическая абсолютная шкала потоков дискретных источников [58].

Изучение спектров излучения мощных дискретных источников позволило выявить ряд интересных особенностей. Например, потоки радиоизлучения от Кассиопеи А и Крабовидной туманности (Тельца А), являющихся остатками вспышек сверхновых звезд, должны с течением времени уменьшаться из-за адиабатического расширения оболочки сверхновой звезды. В результате точных измерений, проведенных в НИРФИ, удалось обнаружить частотную зависимость уменьшения потока от Кассиопеи А, а также уменьшение потока радиоизлучения Крабовидной туманности [60]. В результате многолетних наблюдений в НИРФИ обнаружена странная и пока не объясненная переменность в интенсивности радиоизлучения Кассиопеи А и Крабовидной туманности с характерным временем порядка нескольких лет [61, 62].

С помощью метода "искусственной Луны" удалось проэталонировать среднюю яркостную температуру радиоизлучения Луны в диапазоне миллиметровых—сантиметровых—дециметровых радиоволн (см. гл. 4), а также обеспечить регулярные прецизионные измерения потоков радиоизлучения Солнца на сантиметровых и метровых волнах, ведущиеся на РАС НИРФИ "Зименки". Эти измерения позволяют использовать Луну и Солнце в качестве эталонных по интенсивности источников радиоизлучения.

8.6. ПАССИВНАЯ РАДИОЛОКАЦИЯ

Еще одним важным направлением практического использования методов радиоастрономии является так называемая пассивная радиолокация. Она основана на том, что поверхность земли и различные предметы по-разному в зависимости от их свойств, температуры, структуры и т.п. излучают и отражают радиоволны, которые могут улавливаться радиотелескопами, позволяя тем самым определить местоположение и конфигурацию этих предметов. Например, наблюдаемое сверху радиоизлучение водных поверхностей существенно меньше, чем излучение поверхности земли; покрытый лесом участок излучает иначе, чем пашня или нива; асфальтовые дороги излучают меньше, чем окружающая их поверхность. Дома, различные постройки также отличаются своим радиоизлучением. Таким образом, с помощью установленного на летательном аппарате радиотелескопа, работающего в СВЧ-диапазоне радиоволн, можно картографировать местность, причем в любую погоду. При этом не нужно посылать какое-то излучение, как в обычном активном радиолокаторе. Поэтому определение местонахождения раз-

личных объектов по тепловому радиоизлучению получило название пассивной радиолокации. Указанное направление интенсивно развивается в нашей стране и за рубежом. Это подтверждается, в частности, значительным количеством публикаций, посвященных физике и технике пассивной радиолокации (см., например, [6—8]).

Пассивная радиолокация тесно связана с исследованиями атмосферы; в частности, сказанное в разд. 8.2 о работах ИРЭ АН СССР по исследованию с самолетов земной поверхности также можно отнести к пассивной радиолокации. К пассивной радиолокации можно отнести и многочастотное зондирование. Напомним, что, например, принцип действия радиометеоскопа основан на том, что на различных длинах волн за излучение ответственны различные слои тропосферы (особенно резко это проявляется вблизи линий резонансного поглощения).

На этом же принципе основаны методы исследования по их собственному радиоизлучению физико-химических свойств различных тел, в частности приповерхностных слоев Луны и других планет. Принимая радиоизлучение и точно измеряя яркостную температуру, например Луны, на различных длинах волн, можно фактически зондировать подповерхностные слои Луны до глубин в несколько метров и таким образом определять физико-химические характеристики лунной поверхности. Эти исследования проводились в 1956 г. в течение 10 лет двумя группами исследователей — в Горьком в НИРФИ и в Москве в ФИАНе (см., например [63, 64, 17], а также гл. 4).

Дистанционное радиометрическое многочастотное зондирование открыло неожиданные возможности и перспективы в столь далекой от радиоастрономии области, какой является медицина. Принимая собственное радиоизлучение человеческого тела на различных длинах волн, можно весьма точно измерять и контролировать температуру в глубине тела, что чрезвычайно важно не только для диагностики, но и лечения различных заболеваний. Эти работы в последние годы успешно развиваются в ряде организаций, в частности в ИРЭ, ИПФ АН СССР, НИРФИ и др. в сотрудничестве с медиками (см., например, [65, 66]).

8.7. ПУЛЬСАРНОЕ ВРЕМЯ

(РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКИЕ СТАНДАРТЫ ЧАСТОТЫ)

В 1978 г. в ФИАНе предложено создать новую астрономическую шкалу времени — шкалу пульсарного времени, основанную на регулярной последовательности интервалов времени между импульсами радиоизлучения пульсаров (см. также гл. 1, 4). Исследования пульсаров ведутся весьма широко во многих радиоастрономических организациях. В частности, экспериментально установлено, что среди достаточно мощных пульсаров многие излучают импульсы с высокой периодичностью.

В частности, случайные флуктуации временных положений пульсаров PSR 0834+6 и 1919+21 составляют 200—500 мкс. Эти пульсары могут служить основными, реперными пульсарами, а шкала пульсарного времени определяется как непрерывная последовательность интервалов времени между импульсами радиоизлучения основного реперного пульсара PSR 0834+6, у которого не только наименьшие флуктуации

положений импульсов по времени (~ 200 мкс), но и наиболее точно измеренные параметры. Поскольку период пульсара с течением времени увеличивается, авторы работ [67, 68] предлагают в качестве интервала времени определенной длительности принять длительность периода излучения основного реперного пульсара на начальный момент отсчета шкалы, т.е. на момент времени, соответствующий положению первого импульса пульсара относительно какого-либо астрономического события, например начала календарного года.

Для хранения и восстановления интервалов и моментов земных шкал времени предлагается использовать интервал времени, определяемый совпадением импульсов от упомянутых трех реперных пульсаров. Точность воспроизведения единицы интервала в пульсарной шкале времени порядка 10^{-11} , а момента времени ~ 200 мкс. Преимуществом пульсарной шкалы времени перед атомной является ее независимость от земных условий.

8.8. РАДИОАСТРОМЕТРИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТРИИ СО СВЕРХДЛИННОЙ БАЗОЙ

Середина 70-х—начало 80-х годов нашего столетия явились годами становления в астрометрии нового направления — радиоастрометрии, основными инструментами которой явились радиоинтерферометры со сверхдлинными базами (РСДБ) [69]. Причем для астрометрии, базирующейся до этого времени на позиционных оптических наблюдениях, это дало не только освоение нового участка спектра электромагнитного излучения космических объектов — радиочастотного, но и новые методические приемы и новые возможности для фундаментальных и прикладных исследований [9]. Положительную роль здесь сыграл тот факт, что разработчиками радиоастрометрического направления явились не астрометристы, а радиоастрономы, сумевшие первыми увидеть исключительные возможности создаваемой ими новой техники радиоастрономических исследований — РСДБ. Для решения астрометрических задач методами длиннбазовой радиоинтерферометрии оказалось весьма удачным сочетание свойств электромагнитного излучения в радиочастотном диапазоне, параметров земной атмосферы и космической среды, а также наличие сверхкомпактных космических радиоисточников, детали которых невозможно различить даже с помощью межконтинентальных баз. В радиодиапазоне можно наблюдать объекты, удаленные на "край" Вселенной, практически вне зависимости от погодных условий, что обеспечивает существенное преимущество радиоастрометрии перед оптической — возможность проведения непрерывных измерений. При этом "сверхудаленность" наблюдаемых космических объектов — квазаров и ядер радиогалактик — делает их идеальными реперами невращающейся фундаментальной небесной системы координат — первоосновы для астрометрических приложений в решении задач гео- и планетодинамики, геодезии, службы времени.

Инициатором астрометрического применения РСДБ явился Горьковский НИРФИ; по данному направлению в г. Горьком в 1968 г. было проведено первое Всесоюзное совещание. Сотрудниками НИРФИ были реализованы в 1972 г. первые радиоастрометрические приложения

результатов РСДБ — наблюдения космических мазеров в линии излучения водяных паров (на базе Пушкино—Симеиз [70]). В последующем в НИРФИ были разработаны методические основы радиоастрометрии на основе дифференциальных радиоинтерферометрических наблюдений космических источников на сверхдлинной базе [71].

Большая работа по развитию методов радиоастрометрии с применением РСДБ проводилась в Ленингр. фил. САО, ГАО, ИТА АН СССР. Пулковскими радиоастрономами в развитие метода дифференциальной радиоастрометрии был разработан так называемый метод дуг [72], дающий геометрическое решение задачи установления небесной системы координат, не требующий в принципе каких-либо априорных предположений о характере кинематики и динамики системы интерферометра — наблюдаемые источники. В ИТА проводились исследования вопросов применения для решения астрономо-геодезических задач многоэлементных радиоинтерферометрических комплексов [73]. В ИКИ АН СССР и НИРФИ разрабатывались также вопросы применения РСДБ для планетных исследований и задач космической навигации. Сотрудниками этих учреждений с использованием аппаратного комплекса РСДБ НИРФИ в 1983 г. была проведена интерферометрия АМС "Венера-15", в 1985 г. — интерферометрия АМС "Вега" [74], а в 1986 г. — исследования комы кометы Галлея при ее пролете АМС "Вега" [75, 76].

В области небесной механики, динамики солнечной системы, космической навигации методы РСДБ позволяют исследовать орбитальное движение планеты и ее осевое вращение путем приема сигналов от радиопередатчиков, установленных на планете. В сочетании с наблюдениями квазаров (для уточнения базовых расстояний системы РСДБ), при этом могут быть уточнены орбиты планет и спутников, исследована динамика системы планета—спутник, в частности системы Земля—Луна. Позволяя измерять весьма точно (до 10^{-3} — 10^{-4} угл. с) угловое расстояние между излучающими объектами (например, радиомаяком и самоходным аппаратом на Луне) системы, РСДБ вносят существенный вклад в космическую навигацию.

Системы РСДБ позволяют определять величину вектора базы интерферометра с погрешностью порядка 10 см, что существенно для решения задач геофизики и геодинамики (движение полюсов Земли, дрейф континентов, вековое изменение момента вращения Земли), а также для создания сети высокоточных геодезических базисов.

Применение методов РСДБ позволяет также создать радиоастрономическую службу всемирного времени и широты, а также систему единого времени на Земле с синхронизацией шкал времени с погрешностью порядка 1 нс.

Фундаментальные ограничения на точность решения радиоастрометрических задач и их приложений связываются в первую очередь с многокомпонентностью структуры большинства космических радиоисточников [77], их переменностью и с релятивистскими эффектами. Первое обстоятельство вызывает необходимость тщательных астрофизических исследований космических радиоисточников, рекомендуемых для решения радиоастрометрических задач. В свою очередь,

прецизионные (на уровне 10^{-3} — 10^{-4} угл.с) измерения положения этих источников, их возможного взаимного перемещения дадут неоценимый материал для исследования динамики Вселенной, ее космологических теорий.

8.9. РАДИОМЕТРИЧЕСКАЯ АППАРАТУРА

Развитие радиоастрономии, как известно, приходится на послевоенное время, когда для удовлетворения нужд различных направлений радиоэлектроники, главным образом радиолокации, достигла достаточного совершенства техника приема и усиления: были существенно уменьшены собственные шумы радиоламп, смесителей и других элементов. Необходимость именно в таком направлении работ обусловлена тем, что интенсивность сигнала, принимаемого даже от Солнца, оказалась намного меньше интенсивности собственных шумов аппаратуры, не говоря уже о радиоизлучении Луны, планет и дискретных источников. Для измерения радиоизлучения этих источников нужно было различить слабый сигнал на фоне в сотни раз более мощных шумов аппаратуры. Были созданы приемные системы — радиометры. Чувствительность их в 1000 раз выше, чем обычных приемников, и они позволяют улавливать тепловое радиоизлучение на сантиметровых волнах даже от слабо нагретых тел, например от человека. На этом основано уже упомянутое выше применение радиометров в медицине, которое, по-видимому, будет быстро развиваться.

Возможность приема радиоизлучения от нагретых даже до невысокой температуры тел привела к созданию точного измерителя очень малых мощностей, составляющих миллиардные доли микроватта, т.е. значительно меньших, чем собственные шумы. Принцип основан на сравнении измеряемой малой мощности, например, какого-либо промышленного генератора стандартных сигналов с мощностью излучения "черного" тела, нагретого до определенной температуры (это излучение определяется температурой тела и точно известно, т.е. является эталонным).

Такие приборы впервые позволили непосредственно измерить очень малые мощности, причем с высокой точностью. Первые макеты микроваттметров были разработаны в Горьковском университете уже в 50-е годы. Перспективность таких приборов была сразу оценена, и в 50-е годы была начата разработка промышленных образцов.

На основе дальнейших разработок таких приборов промышленность серийно выпускает целый комплекс радиометров на широкий диапазон длин волн для общезмерительных целей. Эти приборы вошли в жизнь практически в той же степени, как и генераторы стандартных сигналов, являющиеся основой измерительной техники.

Используемые в настоящее время радиометры по своим параметрам существенно превосходят радиометры 50-х годов. Чувствительность радиометров увеличилась на 2—3 порядка; повсеместно применяются параметрические усилители, мазеры, охлаждаемые параметрические и транзисторные усилители (см., например, [78—80]), обеспечивающие флуктуационный порог чувствительности порядка 10^{-3} К.

Наряду с обычными широко используются корреляционные радиометры, а также спектр-анализаторы (в том числе акустооптические, см., например, [81]) и поляриметры. Радиометры, как правило, сопряжены с управляющими и обрабатывающими микро- и мини-ЭВМ.

Следует отметить, что радиоастрономия не только дала существенный импульс развитию высокочувствительной приемной аппаратуры, но и стимулировала разработку новых принципов приема слабых сигналов: модуляционный, компенсационный, корреляционный [82].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эта глава завершает изложение результатов развития различных, но не всех направлений советской радиоастрономии. Последняя глава достаточно убедительно показывает, что родившаяся благодаря успехам радиофизики и радиотехники новая отрасль фундаментальной науки — радиоастрономия в процессе решения сложнейших познавательных проблем мироздания естественно приводит к сугубо практическим результатам. Результаты, методы и аппаратура, получаемые при решении этих задач, инициируют дальнейшее развитие техники и позволяют успешнее продвигаться во многих научно-технических направлениях, важных для народного хозяйства.

Это — одно из проявлений диалектической связи между фундаментальными и прикладными науками.

ЛИТЕРАТУРА

ПРЕДИСЛОВИЕ

1. Шкловский И.С. Вторая революция в астрономии подходит к концу // *Вопр. философии*. 1979. N 9. С. 54—69.
- 1а. Шкловский И.С. Проблемы современной астрофизики. М.: Наука, 1982. 130 с.
2. Гинзбург В.Л. О физике и астрофизике. М.: Наука, 1985. 312 с.
3. Jansky K.G. Directional studies of atmospherics at high frequencies // *Proc. Inst. Radio Eng.* 1932. Vol. 20. P. 1920—1932.
4. The early years of radio astronomy / Ed. W.T. Sullivan. Cambridge: Univ. press, 1984. 421 p.
5. Котельников В.А., Кузьмин А.Д. Радиоастрономия // *Октябрь и наука*. 1977. С. 236—249.
6. Очерки истории радиоастрономии в СССР. Киев: Наук. думка, 1985. 280 с.
7. Саломонович А.Е. Первые шаги советской радиоастрономии // *Вестн. АН СССР*. 1973. N 3. С. 122—136.
8. Ginzburg V.L. Cosmic rays as the source of Galactic radio emission (1951) // *Classics in radio astronomy* / Ed. W.T. Sullivan. Dordrecht: Reidel, 1982. P. 93—99.
9. Schklovsky I.S. Monochromatic radio emission from the Galaxy and the possibility of its observation (1949) // *Ibid.* P. 318—324.
10. Слыш В.И. Длинноволновое космическое радиоизлучение в межпланетной плазме // *Вестн. АН СССР*. 1966. N 12. С. 27—32.
11. Гетманцев Г.Г., Саломонович А.Е., Слыш В.И. Внеатмосферные радиоастрономические исследования // *Там же*. 1969. N 4. С. 55—60.
12. Саломонович А.Е., Бакун В.Н., Ковалев В.С. и др. Субмиллиметровый телескоп для орбитальной пилотируемой станции "Салют-6" // *Радиотехника*. 1979. Т. 34. С. 33—40.

13. Закон М.Б., Кардашев Н.С., Саввин А.И. и др. Первый радиотелескоп в космосе // *Земля и Вселенная*. 1980. N 4. С. 2—9.

ГЛАВА 1

1. Шкловский И.С. Космическое радиоизлучение. М.: Гостехтеориздат, 1956. 492 с.
2. Шкловский И.С. О природе радиоизлучения Галактики // *Астрон. журн*. 1952. Т. 29. С. 418—449.
3. Гинзбург В.Л. Теория распространения радиоволн в ионосфере. М.: Гостехтеориздат, 1949. 358 с.
4. Гинзбург В.Л. Космические лучи как источник галактического радиоизлучения // *ДАН СССР*. 1951. Т. 76. С. 377—380.
5. Гетманцев Г.Г., Гинзбург В.Л. Об одном возможном механизме спорадического радиоизлучения // *Там же*. 1952. Т. 87. С. 187—190.
6. Гинзбург В.Л. Происхождение космических лучей и радиоастрономия // *УФН*. 1953. Т. 51. С. 343—392.
7. Пикельнер С.Б. Кинематические свойства межзвездного газа в связи с изотропией космических лучей // *ДАН СССР*. 1953. Т. 88. С. 229—232.
8. Разин В.А. Предварительные результаты измерения поляризации космического радиоизлучения на волне 1,45 м // *РЭ*. 1956. Т. 1. С. 846—851.
9. Гетманцев Г.Г., Гинзбург В.Л., Шкловский И.С. Радиоастрономические исследования с помощью искусственных спутников Земли // *УФН*. 1958. Т. 66. С. 157—161.
10. Бенедиктов Е.А., Гетманцев Г.Г., Митяков Н.А. и др. Результаты измерений интенсивности радиоизлучения на частотах 725 и 1525 кГц при помощи аппаратуры, установленной на спутнике "Электрон-2" // *Исследования космического пространства*. М.: Наука, 1965. С. 581—606.

11. *Слыш В.И.* Эксперименты, выполненные станциями "Венера-2" и "Венера-3" на пути к Венере // Земля и Вселенная. 1967. N 5. С. 12—13.
12. *Березинский В.С., Буланов С.В., Гинзбург В.Л.* и др. Астрофизика космических лучей. М.: Наука, 1984. 360 с.
13. *Володин Ю.В., Дагкесаманский Р.Д.* Радиоизлучение туманности Андромеды на частоте 102,5 МГц // Астрофизика. 1977. Т. 13. С. 617—626.
14. *Артюх В.С., Оганнисян М.А.* Наблюдения туманности Андромеды на частоте 103 МГц // Астрон. журн. 1984. Т. 61. С. 639—644.
15. *Гетманцев Г.Г.* Определение среднего размера намагниченных облаков межзвездного газа радиоастрономическим методом // Изв. вузов. Радиофизика. 1958. Т. 1, N 3. С. 158.
16. *Каплан С.А., Пикельнер С.Б.* Межзвездная среда. М.: Физматгиз, 1963. 531 с.
17. *Chibisov G.V., Puskun V.S.* Angular variations of nonthermal radio emission from the galaxy relevant to the structure of interstellar magnetic field // 17th Intern. Cosmic Ray Conf. Paris, 1980. Vol. 2. P. 233—235.
18. *Дагкесаманский Р.Д., Шутенков В.Р.* Вариации интенсивности фонового радиоизлучения и структура магнитного поля Галактики // Письма в "Астрон. журн.". 1987. Т. 13. С. 182—190.
19. *Парийский Ю.Н., Корольков Д.В.* Эксперимент "Холод". Первый глубокий обзор неба с помощью радиотелескопа РАТАН-600 // Итоги науки и техники. Астрономия. М.: ВИНТИ, 1986. Т. 31. С. 73—197.
20. *Гинзбург В.Л., Сыроватский С.И.* Происхождение космических лучей. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 384 с.
21. *Haddock F.T., Mayer C.H., Sloanaker R.M.* Radioobservations of ionized hydrogen nebulae and other discrete sources at a wave-length of 9,4 cm // Nature. 1954. Vol. 174. P. 176—177.
22. Труды Пятого совещания по вопросам космогонии, 9—12 марта 1955 г. М.: Изд-во АН СССР, 1956. 576 с.
23. Радионастрономия. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 190 с. (Тр. ФИАН; Т. 17).
24. *Парийский Ю.Н.* О связи излучения газовых туманностей в водородных линиях и в радиодиапазоне. Новый метод определения расстояний до туманностей // Изв. ГАО. 1960. Т. 21, вып. 5, N 164. С. 54—61.
25. *Парийский Ю.Н.* Наблюдения некоторых галактических источников радиоизлучения на Большом пулковском радиотелескопе // Там же. С. 45—53.
26. *Хромов Г.С., Индисов О.С., Матвеевко Л.И.* и др. Наблюдения радиоизлучения планетарных туманностей на волне 32,5 см // Астрон. журн. 1965. Т. 42. С. 1120—1121.
27. *Чихачев Б.М., Сороченко Р.Л.* Сообщение о начале наблюдений радиоизлучения водорода на волне 21 см // РЭ. 1956. Т. 1. С. 886.
28. *Берулис И.И., Сороченко Р.Л.* Обзор тепловых источников радиоизлучения на волне 8,2 мм с высоким разрешением // Астрон. журн. 1973. Т. 50. С. 270—282.
29. *Парийский Ю.Н., Гольнев В.Я., Липовка Н.М.* Результаты наблюдений галактических радиоисточников в Пулкове на волне 6,4 см // Изв. ГАО. 1967. Т. 24, вып. 6, N 182. С. 163—174.
30. *Липовка Н.М.* Радиоизлучение диска Галактики на волне 4 см // Астрон. журн. 1977. Т. 54. С. 273—284.
31. *Пятунина Т.Б.* Начальная функция масс в R-ассоциациях CMa R1, Mon R1 и Mon R2 по радиоданным // Письма в "Астрон. журн.". 1985. Т. 11. С. 27—36.
32. *Baade W., Minkowski R.* Identification of the radio-sources in Cassiopeia, Cygnus A and Puppis A // Astrophys. J. 1954. Vol. 119. P. 206—214.
33. *Шкловский И.С.* По поводу статей Бааде и Минковского // Астрон. журн. 1954. Т. 31. С. 483—486.
34. *Шайн Г.А., Газе В.Ф.* Туманность IC 443 и новый источник радиоизлучения в Близнецах // ДАН СССР. 1954. Т. 96. С. 713—715.
35. *Гинзбург В.Л., Пикельнер С.Б., Шкловский И.С.* К вопросу о механизме ускорения частиц в оболочках новых и сверхновых звезд // Астрон. журн. 1955. Т. 32. С. 503—513.
36. *Гинзбург В.Л.* О происхождении космических лучей // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1956. Т. 20, N 1. С. 5—16.
37. *Гордон И.М.* Возможность выяснения природы Крабовидной туманности экспериментальным путем // ДАН СССР. 1955. Т. 100, N 1. С. 21—24.
38. *Кузьмин А.Д., Удальцов В.А.* Поляризованные измерения радиоизлучения Крабовидной туманности на волне 10 см // Астрон. циркуляр. 1957. N 187. С. 14—16.
39. *Удальцов В.А.* Измерения поляриза-

- ции полного потока радиоизлучения Крабовидной туманности на волнах 3,3 и 1,6 см // Тр. ФИАН. 1967. Т. 38. С. 103—108.
40. Бакулин П.И., Шкловский И.С. Покрытия Луной двух дискретных источников радиоизлучения // Астрон. журн. 1955. Т. 32. С. 29—32.
 41. Виткевич В.В., Удальцов В.А. Наблюдения за радиоизлучением источника Телец А при покрытии его Луной // Астрон. циркуляр. 1956. N 169. С. 5—6.
 42. Матвеев Л.И., Артюх В.С. О распределении яркости в Крабовидной туманности на метровых волнах // Астрон. журн. 1966. Т. 43. С. 275—279.
 43. Матвеев Л.И., Сороченко Р.Л. Результаты наблюдений покрытия Луной Крабовидной туманности на волне 3,3 см // Там же. 1967. Т. 44. С. 693—696.
 44. Матвеев Л.И., Пынзарь А.В. Измерения прямого восхождения Крабовидной туманности на метровых волнах // Там же. 1969. Т. 46. С. 550—559.
 45. Шкловский И.С. О возможном вековом изменении потока и интенсивности радиоизлучения от некоторых дискретных источников // Там же. 1960. Т. 37. С. 256—264.
 46. Ласточкин В.П., Станкевич К.С. О вековом уменьшении потока Cas A в сантиметровом диапазоне // Там же. 1964. Т. 41. С. 769—770.
 47. Санамян В.А., Асланян А.М. Изменение плотности потока радиоисточника Кассиопея А // Сообщ. Бюрак. обсерватории. 1962. Вып. 30. С. 35—43.
 48. Иванов В.П., Бубукин И.Т., Станкевич К.С. Изменение потока радиоизлучения молодых остатков сверхновых // Письма в "Астрон. журн." 1982. Т. 8. С. 83—85.
 49. Базелян Л.Л., Брауде С.Я., Брук Ю.М. и др. Спектры радиоизлучения источников Cas A, Cyg A, Tau A, Vir A на частотах 12,5—40 МГц // Изв. вузов. Радиофизика. 1963. Т. 6. С. 897—903.
 50. Базелян Л.Л., Брауде С.Я., Мень А.В. Спектры остатков сверхновых НВ-3 и НВ-9 в декаметровом диапазоне волн // Астрон. журн. 1966. Т. 43. С. 740—746.
 51. Алексеев В.А., Антонец М.А., Брауде С.Я. и др. Измерения угловых размеров дискретных источников интерферометром независимого приема на частоте 25 МГц на базе Граково—Зименки // Изв. вузов. Радиофизика. 1973. Т. 16. С. 1318—1319.
 52. Виняйкин Е.Н., Разин В.А. О вековом уменьшении плотностей потоков радиоизлучения остатков сверхновых Кассиопея А и Телец А на частоте 927 МГц // Астрон. журн. 1979. Т. 56. С. 913—917.
 53. Виняйкин Е.Н. Эволюция радиоизлучения Крабовидной туманности: Препр. НИРФИ N 172. Горький, 1983. 32 с.
 54. Агафонов М.И., Асланян А.М., Гуляев А.Г. и др. Радиоизлучение оболочки Крабовидной туманности // Астрон. журн. 1987. Т. 64. С. 60—68.
 55. Барабанов А.П., Иванов В.П., Станкевич К.С., Столяров С.П. Периодические изменения радиоизлучения и эволюции спектра остатка сверхновой Кассиопея А // Там же. 1986. Т. 63. С. 926—938.
 56. Удальцов В.А., Пынзарь А.В., Глушаков А.П. Радиоастрономические исследования по проблеме: пульсар — остаток вспышки сверхновой // УФН. 1978. Т. 124. С. 725—728.
 57. Шкловский И.С. Сверхновые звезды. М.: Наука, 1966. 398 с. То же. 2-е изд. М.: Наука, 1976. 440 с.
 58. Лозинская Т.А. Сверхновые звезды и звездный ветер: Взаимодействие с газом Галактики. М.: Наука, 1986. 304 с.
 59. Кардашев Н.С. Нестационарность спектров молодых источников нетеплового космического радиоизлучения // Астрон. журн. 1962. Т. 39. С. 393—409.
 60. Алексеев Ю.И., Виткевич В.В., Журавлев В.Ф. и др. Наблюдения за радиоизлучением пульсара в метровом диапазоне волн на ДКР-1000 // Астрон. циркуляр. 1968. N 476. С. 3—5.
 61. Hewish A., Bell S.J., Pilkington J.D.H. et al. Observation of rapidly pulsating radio sources // Nature. 1968. Vol. 217. P. 709—713.
 62. Алексеев Ю.И., Виткевич В.В., Журавлев В.Ф., Шитов Ю.П. Новый пульсар PP 0943 и основные характеристики его радиоизлучения // ДАН СССР. 1969. Т. 187. С. 1019—1021.
 63. Виткевич В.В. Пульсары // Природа. 1970. N 7. С. 26—35.
 64. Злобин В.Н., Удальцов В.А. Спорadicкое узкополосное радиоизлучение пульсаров // Письма в "Астрон. журн." 1976. Т. 2. С. 29—34.
 65. Кардашев Н.С. Магнитный коллапс и природа мощных источников косми-

- ческого радиоизлучения // Астрон. журн. 1964. Т. 41. С. 807—813.
66. Манчестер Р., Тейлор Дж. Пульсары / Пер. с англ. под ред. А.Д. Кузьмина. М.: Мир, 1980. 292 с.
 67. Гинзбург В.Л., Железняков В.В., Зайцев В.В. Когерентные механизмы радиоизлучения и магнитные модели пульсаров // УФН. 1969. Т. 98. С. 201—236.
 68. Извекова В.А., Кузьмин А.Д., Малофеев В.М., Шитов Ю.П. Средние потоки и профили импульсов радиоизлучения пульсаров на частотах 102,5 и 61,5 МГц // Астрон. журн. 1979. Т. 56. С. 322—331.
 69. Пульсары. М.: Наука, 1989. (Тр. ФИАН; Т. 199).
 70. Bartel N., Kardashev N.S., Kuzmin A.D. et al. The simultaneous two-station single pulse observation of radio pulsars over a broad frequency range. I. With particular reference to PSR 0809+74 // Astron. and Astrophys. 1981. Vol. 93. P. 85—92.
 71. Davies J.G., Lyne A.G., Smith F.G. et al. The magnetic field structure of PSR 0809+74 // Month. Notic. Roy. Astron. Soc. 1984. Vol. 211. P. 57—68.
 72. Kuzmin A.D., Malofeev V.M., Izveкова V.A. et al. A comparison of high-frequency and low-frequency characteristics of pulsars // Astron. and Astrophys. 1986. Vol. 161. P. 183—194.
 73. Шитов Ю.П. Зависимость спектра от периода и явление скручивания магнитного поля пульсаров // Астрон. журн. 1983. Т. 60. С. 541—553.
 74. Шитов Ю.П., Малофеев В.М. Сверхдисперсионное запаздывание импульсов пульсара PSR 0809+74 на метровых волнах // Письма в "Астрон. журн." 1985. Т. 11. С. 94—100.
 75. Брук Ю.М., Шитов Ю.П., Малофеев В.М. и др. Измерения средних профилей пульсара PSR 0809+74 с временной привязкой в диапазоне 100—16 МГц // Там же. 1986. Т. 12. С. 912—917.
 76. Шитов Ю.П., Малофеев В.М., Извекова В.А. Сверхдисперсионное запаздывание импульсов пульсаров на низких частотах // Там же. 1988. Т. 14. С. 429—437.
 77. Bruck Yu.M., Ustimenko B.Yu. Decametric pulse radio emission from PSR 1809, PSR 1133 and PSR 1919 // Nature. Phys. Sci. 1973. Vol. 242. P. 58—59.
 78. Bruck Yu.M., Ustimenko B.Yu. The inter-pulse radio emission of the pulsar PSR 1919+21 at the frequencies 16,7—38 MHz // Astrophys. and Space Sci. 1977. Vol. 51. P. 225—227.
 79. Сулейманова С.А., Володин Ю.В., Шитов Ю.П. Поляризационные профили средних импульсов пульсаров на частоте 102,5 МГц: Препр. ФИАН СССР N 172. М., 1986. 25 с.
 80. Извекова В.А., Кузьмин А.Д., Шитов Ю.П. Обнаружение регулярного "аномального" по направлению дрейфа субимпульсов пульсара PSR 0320+39 // Астрон. журн. 1982. Т. 59. С. 536—542.
 81. Кардашев Н.С., Кузьмин А.Д., Николаев Н.Я. и др. Наблюдения пульсаров с временным разрешением 10 мкс на частоте 102,5 МГц // Там же. 1978. Т. 55. С. 1024—1030.
 82. Смирнова Т.В., Соголаснов В.А., Попов М.В., Новиков А.Ю. Исследование корреляции микроимпульсного излучения на близких частотах // Там же. 1986. Т. 63. С. 84—93.
 83. Кузьмин О.А. Периодическая микроструктура радиоизлучения пульсара 1133+16 по результатам трехчастотных наблюдений на метровых волнах // Там же. 1985. Т. 62. С. 234—239.
 84. Izveкова V.A., Kuzmin A.D., Malofeev V.M. et al. Radio spectra of pulsars // Astrophys. and Space Sci. 1981. Vol. 78. P. 45—83.
 85. Кузьмин А.Д., Соловьев А.Г. Расчет спектров и формы средних профилей радиоизлучения пульсаров // Астрон. журн. 1986. Т. 63. С. 62—70.
 86. Ochelkov Yu.P., Usov V.V. Curvature radiation of relativistic particles in the magnetosphere of pulsars // Astrophys. and Space. Sci. 1980. Vol. 69. P. 439—460.
 87. Бескин В.С., Гуревич А.В., Истомин Я.Н. Электродинамика магнитосферы пульсара // ЖЭТФ. 1983. Т. 85. С. 401—433.
 88. Кузьмин А.Д., Дагкесаманская И.М., Пузачев В.Д. Ориентация магнитной оси пульсаров и ее изменение в процессе эволюции // Письма в "Астрон. журн." 1984. Т. 10. С. 854—859.
 89. Шишов В.И. Влияние рефракции на характеристики мерцаний и на среднюю форму импульсов пульсаров // Астрон. журн. 1973. Т. 50. С. 941—948.
 90. Малумян В.Г. Наблюдения области центра Галактики на волне $\lambda = 33,3$ см на БРТ ГАО // ДАН СССР. 1959. Т. 129. С. 1003—1004.
 91. Рыжков Н.Ф., Егорова Т.М., Голсачинский И.В., Быстрова Н.В. На-

- блюдения центра Галактики в непрерывном спектре на частоте 1420 МГц и в линии H I // Изв. ГАО. 1964. Т. 23, вып. 3, N 172. С. 3—8.
92. *Brezgunov V.N., Dagkesamansky R.D., Udal'tsov V.A.* The low-frequency cutoff in the radio spectrum of Sagittarius A // *Astrophys. Lett.* 1971. Vol. 9. P. 117—119.
 93. *Арискин В.И., Берулис И.И., Брезгунов В.Н.* и др. Некоторые результаты измерений области центра Галактики в миллиметровом и метровом диапазонах волн // Изв. вузов. Радиофизика. 1973. Т. 16. С. 1135—1141.
 94. *Берлин А.Б., Гольнев В.Я., Есеникина Н.А.* и др. Многочастотное радиоизображение источника Стрелец А по наблюдениям на РАТАН-600 // Письма в "Астрон. журн." 1976. Т. 2. С. 419—424.
 95. *Берлин А.Б., Парийский Ю.Н., Соболева Н.С.* Одномерное радиоизображение источника Стрелец А на волне 1,38 см // *Астрон. журн.* 1984. Т. 61. С. 1041—1047.
 96. *Докучаев В.И.* Форма и ориентация радиоисточника Sgr A West // Письма в "Астрон. журн." 1981. Т. 7. С. 26—28.
 97. *Озерной Л.М., Шишов В.И.* Рассеяние излучения и мерцание центра Галактики как индикаторы его природы // Там же. 1977. Т. 3. С. 435—439.
 98. *Озерной Л.М., Шишов В.И.* К определению размеров "точечного" радиоисточника в центре Галактики // Там же. 1979. Т. 5. С. 171—176.
 99. *Кардашев Н.С.* Феноменологическая модель ядра Галактики // Итоги науки и техники. Астрономия. М.: ВИНТИ, 1983. Т. 24. С. 183—204.
 100. *Озерной Л.М.* Симбиотическая модель источника в центре Галактики // *Астрон. циркуляр.* 1984. N 1349. С. 1—5.
 101. *Шкловский И.С.* Наблюдаемые особенности "центрального парсека" Галактики как проявление непрерывного процесса звездообразования // Письма в "Астрон. журн." 1985. Т. 11. С. 163—168.
 102. *Шкловский И.С.* Проблема космического радиоизлучения // *Астрон. журн.* 1953. Т. 30. С. 15—36.
 103. *Шкловский И.С.* О природе радиоизлучения радиогалактики NGC 4486 // Там же. 1955. Т. 32. С. 215—225.
 104. *Амбарцумян В.А.* Научные труды. Ереван: Изд-во АН АрмССР, 1960. Т. 2. 361 с.
 105. Труды Шестого совещания по вопросам космогонии, 5—7 июня 1957 г. М.: Изд-во АН СССР, 1959. 274 с.
 106. *Кардашев Н.С., Кузьмин А.Д., Сыроватский С.И.* О природе излучения радиогалактики Лебедь А // *Астрон. журн.* 1962. Т. 39. С. 216—221.
 107. *Гольнев В.Я., Парийский Ю.Н.* Прямые восхождения, структура и спектры 20 внегалактических источников по наблюдениям в Пулковке на волне 6,4 см // Там же. 1965. Т. 42. С. 305—315.
 108. *Braude S.Ya., Lebedeva O.M., Megn A.V.* et al. The spectra of discrete radio sources at decametric wavelengths // *Month. Notic. Roy. Astron. Soc.* 1969. Vol. 143. P. 289—317.
 109. *Артюх В.С., Виткевич В.В., Дагкесаманский Р.Д., Кожухов В.Н.* Потoki и спектральные индексы источников 3С и 3СR каталогов на частоте 86 МГц // *Астрон. журн.* 1968. Т. 45. С. 712—725.
 110. *Sligh V.L.* Angular size of radio stars // *Nature.* 1963. Vol. 199. P. 682.
 111. *Шкловский И.С.* Радиогалактики // *Астрон. журн.* 1960. Т. 37. С. 945—960.
 112. *Шкловский И.С.* О природе радиогалактик // Там же. 1962. Т. 39. С. 591—606.
 113. *Пахольчик А.* Радиогалактики. М.: Мир, 1980. 239 с.
 114. *Курильчик В.Н.* Внегалактические источники космического радиоизлучения. I. Спектры радиоизлучения, их статистические характеристики, интерпретация, классификация // *Астрон. журн.* 1970. Т. 47. С. 787—803.
 115. *Курильчик В.Н.* Внегалактические источники космического радиоизлучения. II. Связь между спектрами радиоизлучения и видом оптических объектов. // Там же. С. 1157—1165.
 116. *Сыроватский С.И.* О спектре галактических и солнечных космических лучей // *ЖЭТФ.* 1961. Т. 40. С. 1788—1793.
 117. *Шоломицкий Г.Б.* Флуктуации потока СТА-102 на волне 32,5 см // *Астрон. журн.* 1965. Т. 42. С. 673—674.
 118. *Костенко В.И., Матвеев Л.И.* Исследование спектров источников космического радиоизлучения 3С 273 и 3С 84 в мм и см диапазонах волн // Там же. 1966. Т. 43. С. 280—283.
 119. *Костенко В.И., Матвеев Л.И.* Периодичность плотностей потоков неко-

- торых источников радиоизлучения на частоте 5760 МГц // Там же. 1968. Т. 45. С. 1181—1184.
120. Гинзбург В.Л., Озерной Л.М. О гравитационном коллапсе магнитной звезды // ЖЭТФ. 1964. Т. 47. С. 1030—1040.
 121. Озерной Л.М. О механизме переменного излучения и природе квазизвездных объектов // Тр. симпоз. "Переменные звезды и звездная эволюция". М.: Наука, 1965. С. 140—155.
 122. Озерной Л.М. К теории образования и строения квазизвездных радиоисточников // Астрон. журн. 1966. Т. 43. С. 300—312.
 123. Ozernoi L.M., Sazonov V.N. Relativistic phenomena by observations of non-thermal cosmic sources // Nature. 1968. Vol. 219. P. 467—469.
 124. Ozernoi L.M., Sazonov V.N. The spectrum and polarization of a source of synchrotron emission with components flying apart at relativistic velocities // Astrophys. and Space Sci. 1969. Vol. 3. P. 395—423.
 125. Матвеев Л.И., Кардашев Н.С., Шоломицкий Г.Б. О радиointерферометре с большой базой // Изв. вузов. Радиофизика. 1965. Т. 8. С. 651—654.
 126. Бродерик Д.Д., Виткевич В.В., Джонси Д.Л. и др. Наблюдения компактных радиоисточников на радиointерферометре с базой Грин-Бэнк—Крым // Астрон. журн. 1970. Т. 47. С. 784—786.
 127. Комберг Б.В. Возможная модель переменных радиоисточников со сверхсветовыми движениями VLBI-компонент // Там же. 1986. Т. 63. С. 874—883.
 128. Дагкесаманский Р.Д. О зависимости спектрального индекса внегалактических радиоисточников от плотности потока // Астрофизика. 1969. Т. 5. С. 297—304.
 129. Dagkesamansky R.D. Spectral index — flux density relation for quasars // Nature. 1970. Vol. 226. P. 432.
 130. Braude S.Ya., Megn A.V., Rashkovski S.L. et al. Decametric survey of discrete sources in the northern sky // Astrophys. and Space Sci. 1978. Vol. 54. P. 37—128.
 131. Соколов К.П. Определение параметров пространственного распределения внегалактических радиоисточников, наблюдаемых на дециметровых волнах. Прямой счет радиоисточников на частоте 25 МГц // Астрон. журн. 1986. Т. 63. С. 426—433.
 132. Соколов К.П. Исследование эффектов космологической эволюции внегалактических радиоисточников, наблюдаемых в дециметровом диапазоне // Письма в "Астрон. журн." 1986. Т. 12. С. 259—265.
 133. Соболева Н.С. Многочастотные одномерные распределения радиояркости для 47 радиогалактик в сантиметровом диапазоне волн. I // Астрофиз. исслед. 1981. Т. 14. С. 50—113.
 134. Исследования скоплений галактик и внегалактических источников радиоизлучения. М.: Наука, 1988. 210 с. (Тр. ФИАН; Т. 189).
 135. 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. С. 55—58.
 136. Шишов В.И., Шишова Т.Д. Влияние размеров источника на спектры межпланетных мерцаний. Теория // Астрон. журн. 1978. Т. 55. С. 411—418.
 137. Артюх В.С., Ветухновская Ю.Н. Исследование радиоисточников типа BL Lac на частоте 102 МГц // Там же. 1981. Т. 58. С. 689—700.
 138. Artyukh V.S., Speed B. Low frequency observations of the scintillation of weak radio sources // Astrophys. and Space Sci. 1979. Vol. 61. P. 229—241.
 139. Bovko V.P., Zhouch I.N. Scintillations of cosmic radio sources in the decametre waveband // Ibid. 1981. Vol. 79. P. 165—189.
 140. Товмассян Г.М., Шахбазян Р.К. Об отождествлении космических радиоисточников // Изв. АН АрмССР. Сер. физ.-мат. наук. 1961. Т. 14, N 5. С. 121—140.
 141. Tovmassian H.M., Moiseev I.G. Radio emission from clusters of galaxies // Austral. J. Phys. 1967. Vol. 20. P. 715—724.
 142. Товмассян Г.М., Ширбакян М.С. О радиоизлучении скоплений галактик // Астрофизика. 1974. Т. 10. С. 29—38.
 143. Шоломицкий Г.Б., Кокин Ю.Ф. Радиоизлучение скоплений галактик // Астрон. журн. 1965. Т. 42. С. 674—676.
 144. Комиссаров С.С. Поздние стадии эволюции радиогалактик и радиогало скоплений // Там же. 1985. Т. 62. С. 651—661.
 145. Zel'dovich Ya.B., Sunyaev R.A. The interaction of matter and radiation in the

- hot model // *Astrophys. and Space Sci.* 1969. Vol. 6. P. 285—300.
146. *Sunyaev R.A., Zel'dovich Ya.B.* The velocity of clusters of galaxies relative to the microwave background // *Month. Notic. Roy. Astron. Soc.* 1980. Vol. 190. P. 413—420.
 147. *Королев В.А., Сюняев Р.А., Якубцев Л.А.* Ожидаемые кривые подсчетов микроволновых источников излучения, связанных с богатыми скоплениями галактик // *Письма в "Астрон. журн."* 1986. Т. 12. С. 339—352.
- ## ГЛАВА 2
1. *Шкловский И.С.* Космическое радиоизлучение. М.: Гостехтеориздат, 1956. 492 с.
 2. Очерки истории радиоастрономии в СССР. Киев: Наук. думка, 1985. 280 с.
 3. *Чихачев Б.М., Сороченко Р.Л.* Установка для наблюдений спектральной линии радиоизлучения водорода на волне 21 см // *Тр. Пятого совещ. по вопр. космогонии*, 9—12 марта 1955 г. М.: Изд-во АН СССР, 1956. С. 546—549.
 4. *Сороченко Р.Л.* [Выступление в прениях] // Там же. С. 550—551.
 5. *Ханин С.Я.* [Выступление в прениях] // Там же. С. 551—552.
 6. *Rydbeck O.E.H., Ellder J., Irvine W.H.* Radio detection of interstellar CH // *Nature*. 1973. Vol. 246. P. 466—468.
 7. *Гетманцев Г.Г., Станкевич К.С., Троцкий В.С.* Монохроматическое радиоизлучение дейтерия на волне 91,6 см из центра Галактики // *Тр. Пятого совещ. по вопр. космогонии*, 5—12 марта 1955 г. М.: Изд-во АН СССР, 1956. С. 539—545.
 8. *Эджи Р.Л.* Попытка обнаружить линию 327 МГц дейтерия в радиоизлучении Галактики. М.: Изд-во иностр. лит., 1961. 594 с.
 9. *Pasachoff J.M., Cesarsky D.A.* Further observation of the interstellar deuterium // *Astrophys. J.* 1974. Vol. 193. P. 65—67.
 10. *Сороченко Р.Л.* Предварительные результаты наблюдений на $\lambda=21$ см участка Млечного Пути с центром $\alpha=20^{\circ}10'$, $\delta=42^{\circ}30'$ // *Астрон. журн.* 1961. Т. 38. С. 478—482.
 11. *Сороченко Р.Л., Арискин В.И.* Пространственное распределение нейтрального водорода в созвездии Лебедь // *Тр. ФИАН.* 1962. Т. 17. С. 115—127.
 12. *Лозинская Т.А., Кардашев Н.С.* Толщина газового диска Галактики по наблюдениям в линии 21 см // *Астрон. журн.* 1963. Т. 40. С. 209—215.
 13. *Кардашев Н.С., Лозинская Т.А., Спенцова Н.Ф.* Спиральная структура Галактики по наблюдениям в линии 21 см // Там же. 1964. Т. 41. С. 601—611.
 14. *Егорова Т.М., Рыжков Н.Ф.* Приемник на волну 21 см для наблюдений нейтрального водорода на большом пулковском радиотелескопе // *Изв. ГАО.* 1964. Т. 23, N 172. С. 194—202.
 15. *Рыжков Н.Ф., Егорова Т.М., Госачинский И.В.* и др. О поглощении межзвездным нейтральным водородом излучения источника Стрелец А // *Астрон. журн.* 1963. Т. 40. С. 17—22.
 16. *Быстрова Н.В., Госачинский И.В., Егорова Т.М.* и др. Нейтральный водород в направлении туманности NGC 6618 (Омега) // *Изв. ГАО.* 1964. Т. 23. С. 111—115. — *Они же.* Тонкая структура радиоисточника W 43 и W 51 по наблюдениям с высоким угловым разрешением // Там же. С. 116—120.
 17. *Госачинский И.В.* Соотношение газа и пыли в направлении туманности NGC 6618 (Омега) // *Астрон. журн.* 1965. Т. 42. С. 929—931. — *Он же.* Нейтральный водород в области галактических долгот $l^{\text{II}} = 10\text{--}40^{\circ}$ // Там же. 1966. Т. 43. С. 284—290.
 18. *Рыжков Н.Ф.* Радиоспектрограф на волну 21 см // *Изв. ГАО.* 1972. N 188. С. 172—179.
 19. *Быстрова Н.В., Рахимов И.А.* Пулковский обзор неба в радиолнии межзвездного водорода. Л.: "Наука, 1977. 4 с.
 20. *Быстрова Н.В.* Карты к Пулковскому обзору неба в радиолнии межзвездного нейтрального водорода. Л.: Наука, 1980. 60 с.
 21. *Венгер А.П., Грачев В.Г., Егорова Т.М.* и др. Спектрометрический комплекс ПАТАН-600 // *Сообщ. САО.* 1982. Вып. 35. С. 5—15.
 22. *Алферова З.В., Венгер А.П., Госачинский И.В.* и др. Нейтральный водород в окрестности галактических радиоисточников. Туманность Ориона // *Астрон. журн.* 1979. Т. 56. С. 1191—1201.
 23. *Алферова З.А., Венгер А.П., Госачинский И.В.* и др. Нейтральный водород в области радиоисточника Стрелец В2 // *Письма в "Астрон. журн."* 1980. Т. 6. С. 769—762.
 24. *Venger A.P., Gosachinskiy I.B., Grachev V.G.* Neutral hydrogen in the vicinity of the radio source W 43 and W 51 // *Astron. Zh.* 1980. Vol. 57. P. 1191—1201.

- nity of Galactic radio sources. I. HII envelopes around HII regions // *Astrophys. and Space Sci.* 1985. Vol. 107. P. 271—287.
25. *Gosachinskiy I.V., Khersonskiy V.K.* Neutral hydrogen in the vicinity of Galactic radio sources. III. Evolutionary characteristics of old Supernova remnants // *Ibid.* Vol. 108. P. 303—317.
 26. *Gosachinskiy I.V., Khersonskiy V.K.* Neutral hydrogen in the vicinity of Galactic radio sources. II. Model of interaction of HII regions with on interstellar medium // *Ibid.* Vol. 107. P. 289—302.
 27. *Кардашев Н.С.* О возможности обнаружения разрешенных линий атомарного водорода в радиодиапазоне // *Астрон. журн.* 1959. Т. 36. С. 838—844.
 28. *Wild J.* The radio-frequency line of atomic hydrogen and its application in astronomy // *Astrophys. J.* 1952. Vol. 115. P. 206—221.
 29. *Егорова Т.М., Рыжков Н.Ф.* Новый метод наблюдений узких спектральных линий в радиодиапазоне // *Изв. ГАО,* 1960. Т. 21, N 164. С. 140—152.
 30. *Сороченко Р.Л.* Спектральные линии возбужденного водорода в радиодиапазоне и экспериментальные возможности их наблюдений // *Тр. ФИАН.* 1965. Т. 28. С. 116—128.
 31. *Sorochenko R.L., Borodzich E.V.* The detection of 3 cm line in Omega nebulae // *Trans. IAU.* 1964. Vol. 12. P. 360.
 - 31a. *Сороченко Р.Л., Бородзич Э.В.* Обнаружение в туманности NGC 6618 (Омега) радиоизлучения линии возбужденного водорода // *ДАН СССР.* 1965. Т. 163. С. 603—605.
 32. *Дравских З.В., Дравских А.Ф.* О попытке наблюдения радиолнии возбужденного водорода // *Астрон. циркуляр.* 1964. N 282. С. 2—4.
 33. *Дравских А.Ф., Дравских З.В., Колбасов В.А.* и др. Исследование радиолнии возбужденного водорода на волне 5 см с применением квантового парамагнитного усилителя // *ДАН СССР.* 1965. Т. 163. С. 332—334.
 34. *Dravskikh A.F., Dravskikh Z.V., Kolbasov V.A.* The detection of the exited H-line at Pulkovo // *Trans. IAU.* 1964. Vol. 2. P. 360.
 35. *Höglund B., Mezger P.G.* Hydrogen emission line $n_{110} \rightarrow n_{109}$: Detection at 5009 Megahertz in Galactic HII regions // *Science.* 1965. Vol. 150. P. 339—348.
 36. *Lilley A.E., Menzel D.H., Penfield H.* et al. Detection of hydrogen emission lines $n_{159} \rightarrow n_{158}$ and $n_{157} \rightarrow n_{156}$ in Galactic HII regions // *Nature.* 1965. Vol. 209. P. 468—470.
 37. *Сороченко Р.Л., Бородзич Э.В., Дравских А.Ф.* и др. Радиолнии возбужденного водорода // *Открытия в СССР.* М.: ЦНИИПИ, 1968. N 47.
 38. *Бурева Л.А., Собельман И.И., Сороченко Р.Л.* О дискретном спектре атомарного водорода в радиодиапазоне // *Астрон. журн.* 1967. Т. 44. С. 995—1000.
 39. *Гуднов В.М., Горячев И.М., Колбасов В.А.* и др. Нулевой спектральный радиометр на волну 5,2 см с симметричным методом приема // *Тр. ФИАН.* 1969. Т. 47. С. 6—20.
 40. *Гуднов В.М., Сороченко Р.Л.* Радиоизлучение линии возбужденного водорода $n_{105} \rightarrow n_{104}$ в некоторых туманностях северного неба // *Астрон. журн.* 1967. Т. 44. С. 1001—1008.
 41. *Гуднов В.М., Зотов В.А., Нагорных Л.М.* и др. Обнаружение в туманности Орiona радиолнии гелия на частоте 5765,2 МГц // *Там же.* 1968. Т. 45. С. 942—944.
 42. *Sorochenko R.L., Pusanov V.A., Salomonovich A.E.* et al. Detection of the Galactic radioline H56 α — the first radio line observed in the millimeter band // *Astrophys. Lett.* 1969. Vol. 3. P. 7—10.
 43. *Сороченко Р.Л., Берулис И.И., Гусев В.А.* и др. Аппаратурный комплекс для спектральных исследований на радиотелескопе РТ-22 ФИАН // *Тр. ФИАН.* 1965. Т. 159. С. 50—56.
 44. *Smirnov G.T., Sorochenko R.L., Pankonin V.* Stark boadening of radio recombination lines towards the Orion nebula // *Astron. and Astrophys.* 1984. Vol. 135. P. 116—121.
 45. *Арискин В.И., Колотовкина С.А., Лехт Е.Е.* и др. Поиск рекомбинационных радиолний водорода в диапазоне метровых волн и ограничение на параметры межзвездного ионизованного газа // *Астрон. журн.* 1982. Т. 59. С. 38—43.
 46. *Ершов А.А., Илясов Ю.П., Лехт Е.Е.* и др. Низкочастотные радиолнии возбужденного углерода в направлении Кассиопеи А. Наблюдения на частотах 42, 57 и 84 МГц // *Письма в "Астрон. журн."* 1984. Т. 10. С. 838—845.
 47. *Konvalenko A.A., Sodin L.G.* Neutral ^{14}N in the interstellar medium // *Nature.* 1980. Vol. 283. P. 360—361.
 48. *Коноващенко А.А., Содин Л.Г.* О линии поглощения 26, 13 МГц в направлении

- Кассиопеи А // Письма в "Астрон. журн." 1981. Т. 7. С. 403—405.
49. Коноваленко А.А., Соди́н Л.Г. Отрицательный результат попытки обнаружения рекомбинационных линий водорода в дециметровом диапазоне // Там же. 1979. Т. 5. С. 663—664.
 50. Коноваленко А.А. Наблюдения рекомбинационных линий углерода на дециметровых волнах в направлении источника Кассиопея А // Там же. 1984. Т. 10. С. 846—853.
 51. Сороченко Р.Л., Смирнов Г.Т. Рекомбинационные радиолнии на самых низких частотах и новый способ оценки интенсивности мягких космических лучей // Там же. 1987. Т. 13. С. 191—198.
 52. Ершов А.А., Лехт Е.Е., Рудницкий Г.М. и др. Низкочастотные радиолнии возбужденного углерода в направлении радиоисточника Кассиопея А // Там же. 1982. Т. 8. С. 694—699.
 53. Сороченко Р.Л. Радиолнии высоко-возбужденного водорода в миллиметровом диапазоне волн // Спектральные исследования космического и атмосферного излучения. Горький: ИПФ АН СССР, 1979. С. 5—33.
 54. Берулис И.И., Сороченко Р.Л. Обзор зон НII северного полушария в радиолнии H56 α // Тез. докл. на XV Всесоюз. конф. по галакт. и внегалакт. радиоастрономии. Харьков, 1983. С. 190—191.
 55. Берулис И.И., Ершов А.А. Модель W3 (OH) по наблюдениям рекомбинационных радиолний // Письма в "Астрон. журн." 1983. Т. 9. С. 656—661.
 56. Weinreb S., Barret A.H., Meeks M.L. et al. Radio observations of OH in the interstellar medium // Nature. 1963. Vol. 200. P. 829—831.
 57. Быстрова Н.В., Егорова Т.М., Рыжков Н.Ф. и др. Наблюдения радиолнии OH в направлении центра Галактики // Астрон. циркуляр. 1964. N 310. С. 5—8.
 58. Быстрова Н.В., Егорова Т.М., Рыжков Н.Ф. Межзвездный гидроксил в области центра Галактики // Изв. ГАО. 1966. N 180. С. 125—129.
 59. Быстрова Н.В., Госачинский И.В., Егорова Т.М. и др. Определение координат некоторых галактических источников аномально возбужденного гидроксила // ДАН СССР. 1970. Т. 191. С. 791—794.
 60. Космические мазеры / Пер. с англ. под ред. В.И. Слыша. М.: Мир, 1974. 214 с.
 61. Fillit R., Cheudin M., Rien N.Q. et al. New OH sources associated with IR-late-type stars // Astron. and Astrophys. 1972. Vol. 21. P. 317—319.
 62. Pasichenko M.I., Slysh V.I. A map of the OH absorption in the direction of W 28 // Ibid. 1974. Vol. 35. P. 153—155.
 63. Пащенко М.И., Слыш В.И. Исследование поглощения в радиолниях OH излучения галактических источников // Астрон. журн. 1977. Т. 54. С. 790—860.
 64. Пащенко М.И., Рудницкий Г.М., Френкелен О. Новый источник мазерного радионизлучения вблизи объекта Хербига—Аро // Письма в "Астрон. журн." 1979. Т. 5. С. 517—520.
 65. Chenng A.C., Rank D.H., Townes C.H. et al. Detection of water in interstellar regions by its microwave radiation // Nature. 1969. Vol. 221. P. 626—628.
 66. Арискин В.И., Кутуза Б.Г., Сороченко Р.Л. Профиль радиолнии водяного пара от W49 // Астрон. циркуляр. 1969. N 529. С. 1—2.
 67. Берулис И.И., Гладышев А.С., Лехт Е.Е. и др. Кооперативные наблюдения долгопериодических переменных звезд в радиолнии H₂O и в ИК-диапазоне // Науч. информ. Астросовета АН СССР. Рига, 1984. Вып. 56. С. 92—96.
 68. Лехт Е.Е., Пащенко М.И., Сороченко Р.Л. Активные фазы источников мазерного излучения H₂O в области звездообразования // Тез. докл. на XV Всесоюз. конф. по галакт. и внегалакт. радиоастрономии. Харьков. 1983. С. 214.
 69. Венгер А.П., Егорова Т.М., Госачинский И.В. и др. Наблюдение радиолнии H₂O в источниках W 49 и Орион А // Письма в "Астрон. журн." 1981. Т. 7. С. 677—681.
 70. Shyder L.E., Buhl D., Zuckerman B. et al. Microwave detection of interstellar formaldehyde // Phys. Rev. Lett. 1969. Vol. 22. P. 679—681.
 71. Госачинский И.В., Грачев В.Г., Егорова Т.М. и др. Межзвездный формальдегид в радиоисточнике Стрелец B2 // Письма в "Астрон. журн." 1980. Т. 6. С. 763—767.
 72. Госачинский И.В., Херсонский В.К. Модель радиоисточника Стрелец B2 // Астрон. журн. 1981. Т. 58. С. 743—753.
 73. Толмачев А.М., Сороченко Р.Л. Наблюдения вращательного перехода J =

= 4—3 межзвездного цианацетилен // Письма в "Астрон. журн." 1981. Т. 7. С. 682—688.

ГЛАВА 3

74. *Sorochenko R.L., Tolmachev A.M., Winnewisser G.* High resolution measurements of cyanoacetylene in dark clouds // *Astron. and Astrophys.* 1986. Vol. 237—241.
75. *Колотовкина С.А., Сороченко Р.Л., Толмачев А.М.* Структура молекулярных облаков ТМС-1, DR-21, M17 по наблюдениям в линии $J=4-3$ HC_3N // Письма в "Астрон. журн." 1986. Т. 12. С. 903—911.
76. *Зинченко И.И., Кисляков А.Г.* Поиск и исследование конденсаций звездообразования в темных галактических туманностях // Спектральные исследования космического и атмосферного излучения. Горький: ИПФ АН СССР, 1979. С. 34—66.
77. *Зиниченко И.И., Кисляков А.Г., Буров А.Б.* и др. Спектральные радиоастрономические наблюдения в интервале длин волн 2—4 мм // Письма в "Астрон. журн." 1987. Т. 13. С. 582—588.
78. *Kislyakov A.G., Turner B.E.* CO emission associated with compact continuum sources in dark clouds // *Astron. J.* 1976. Vol. 81. 302—307.
79. *Kislyakov A.G., Gordon M.A.* CO emission in direction of some millimeter wavelength continuum sources // *Astrophys. J.* 1983. Vol. 265. P. 766—777.
80. *Кисляков А.Г., Уолсли К.М., Винневисер Г., Батрла В.* и др. Формальдегид и аммиак в туманностях L 255 и L 673 // Тез. докл. на XV Всесоюз. конф. по галакт. и внегалакт. радиоастрономии. Харьков, 1983. С. 203—204.
81. *Sandell G., Höglund B., Kislykov A.G.* $\text{HCN } J=1-0$ observations in L 673 and S 235B: two different case of hyperfine anomalies // *Astron. nad Astrophys.* 1983. Vol. 201. P. L149—152.
82. *Turner B.E., Kislyakov A.G., Liszt M.S.* et al. Microwave detection of interstellar cyanamide // *Astrophys. J.* 1975. Vol. 201. P. 149—152.
83. *Буров А.Б., Воронов В.Н., Зинченко И.И.* и др. Обзор темных туманностей в линии HCN и в континууме на волне 3,4 мм // Астрон. журн. 1982. Т. 59. С. 265—275.
84. *Слыш В.И.* Прецизионный радиотелескоп РТ-70 // XVIII Всесоюз. конф. по радиоастрономии: Тез. докл. Иркутск, 1986. С. 222—223.
1. *Зельдович Я.Б., Новиков И.Д.* Строеение и эволюция Вселенной. М.: Наука, 1975. 735 с.
2. *Ryle M., Scheuer P.A.G.* The spatial distribution and the nature of radio stars // *Proc. Roy. Soc. London.* 1955. Vol. 230. P. 448—462.
3. *Ryle M., Neville A.C.* A radio survey of the north polar region with a 4,5 minute of are pencil-beam system // *Month. Notic. Roy. Astron. Soc.* 1962. Vol. 125. P. 39—56.
4. *Hewish A.* Extrapolation of the number-flux density relation of radio stars by Scheur's statistical method // *Ibid.* 1961. Vol. 123. P. 167—181.
5. *Bolton J.D., Gardner F.F., MacKey M.B.* Tue Parkes catalogue of radio sources. Declination zone — 20° to 60° // *Austral. J. Phys.* 1966. Vol. 17. P. 340—372.
6. *Beron P.* Caunts of radio sourcers in the revised 3C catalogue // *Nature.* 1966. Vol. 211. P. 724—725.
7. *Jauncey D.L.* Re-examination of the source counts for the 3C revised catalogue // *Ibid.* 1967. Vol. 216. P. 877—878.
8. *Longair M.S.* On the interpretation of radio source counts // *Moth. Notic. Roy. Astron. Soc.* 1966. Vol. 133. P. 421—436.
9. *Соколов К.П.* Исследование эффектов космологической эволюции внегалактических радиоисточников, наблюдаемых в декаметровом диапазоне // Письма в "Астрон. журн." 1986. Т. 12. С. 259—265.
10. *Соколов К.П.* Определение параметров пространственного распределения внегалактических радиоисточников, наблюдаемых в декаметровом диапазоне. Прямой счет радиоисточников на частоте 25 МГц // Астрон. журн. 1986. Т. 63. С. 426—433.
11. *Longair M.S.* The counts of radio sources // Confrontation of cosmological theories with observational data. Dordrecht: Reidel, 1974. P. 93—109. (IAU Symp.; N 63).
12. *Windhorst R.A., Miley G.K., Owen F.N.* et al. Sub-millijansky 1,4 GHz source caunts and multicolar studies of weak radio galaxy populations // *Astrophys. J.* 1985. Vol. 289. P. 494—513.
13. *Longair M.S., Pooley G.G.* An angular diameter-redshift test of cosmological models using observations of weak radio sources // *Month. Notic. Roy. Astron. Soc.* 1969. Vol. 145. P. 121—129.
14. *Legg T.H.* Redshift and the size of

- double radio sources // *Nature*. 1970. Vol. 226. P. 65—67.
15. *Miley G.K.* The radio structure of quasars — a statistical investigation // *Month. Notic. Roy. Astron. Soc.* 1971. Vol. 152. P. 477—490.
 16. *Hewish A., Readhead A.C.S., Duffett-Smith P.J.* The angular diameter-redshift relation for scintillating radiosources // *Radioastronomy and cosmology*. Dordrecht: Reidel, 1977. P. 139—147. (IAU Symp.; N 74).
 17. *Fieldon J., Downes A.J.B., Allington-Smith J.R.* et al. Further high-resolution observations of faint radio sources and the angular size-flux density relation // *Month. Notic. Roy. Astron. Soc.* 1983. Vol. 204. P. 289—315.
 18. *Allington-Smith J.R.* Variation of the linear sizes of extragalactic radio sources with radio luminosity and redshift // *Ibid.* 1984. Vol. 210. P. 611—631.
 19. *Зельдович Я.Б.* Наблюдения во Вселенной, однородной в среднем // *Астрон. журн.* 1964. Т. 41. С. 19—24.
 20. *Tully R.B., Fisher J.R.* A new method of determining distances to galaxies // *Astron. and Astrophys.* 1977. Vol. 54. P. 661—673.
 21. *Roberts M.S.* Twenty-one centimeter line widths of galaxies // *Astron. J.* 1978. Vol. 83. P. 1026—1035.
 22. *Tamman G.A., Sandage A., Yahil A.* The determination of cosmological parameters: Prepr. of the Astron. Inst. of Univ. of Basel N 1. Basel, 1979.
 23. *Vaucoulers G. de.* The cosmic distance scale and the Hubble constant // *Observatory*. 1982. Vol. 102. P. 178—194.
 24. *Penzias A.A., Wilson R.W.* A measurement of excess antenna temperature at 4080 Mc/s // *Astrophys. J.* 1965. Vol. 142. P. 419—421.
 25. *Dicke R.H., Peebles P.J.E., Roll P.G., Wilkinson D.T.* Cosmic black—body radiation // *Ibid.* P. 414—419.
 26. *Gamow G.J.* Expanding Universe and the origin of the elements // *Phys. Rev.* 1946. Vol. 70. P. 572—573.
 27. *Alpher R.A., Bethe H.A., Gamow G.J.* The origin of chemical elements // *Ibid.* 1948. Vol. 73. P. 803—804.
 28. *Alpher R.A., Herman R.C.* Theory of the origin and relative abundance distribution of the elements // *Rev. Mod. Phys.* 1950. Vol. 22. P. 153—212.
 29. *Gamow G.J.* The origin of elements and the separation of galaxies // *Phys. Rev.* 1948. Vol. 74. P. 505—506.
 30. *Gamow G.J.* The evolution of the Universe // *Nature*. 1948. Vol. 162. P. 680—682.
 31. *Hayashi C.* Proton-neutron concentration ratio in the expanding Universe at the stages preceding the formation of the elements // *Progr. Theor. Phys.* 1950. Vol. 5. P. 224—235.
 32. *Дорошкевич А.Г., Новиков И.Д.* Средняя плотность излучения в Метагалактике и некоторые вопросы релятивистской космологии // *ДАН СССР*. 1964. Т. 154. С. 809—811.
 33. *McKellar A.* Molecular lines from the lowest states of diatomic molecules composed of atoms probably present in interstellar space // *Publ. Dominion Astrophys. Observ.* 1941. Vol. 7. P. 251—272.
 34. *Шамонов Т.А.* Методика абсолютных измерений эффективной температуры радиоизлучения с низкой эквивалентной температурой // *ПТЭ*. 1957. N 1. С. 83—86.
 35. *Пузанов В.А., Саломонович А.Е., Станкевич К.С.* Измерения температуры реликтового излучения на волне 8,2 мм // *Астрон. журн.* 1967. Т. 44. С. 1128—1130.
 36. *Пиблс П.* Физическая космология. М.: Мир, 1974. 310 с.
 37. *Blair A., Beery J.S., Edeskuty F.* et al. Measurement of the far-infrared background radiation in the night sky // *Phys. Rev. Lett.* 1971. Vol. 27. P. 1154—1157.
 38. *Zel'dovich Ya.B., Sunyaev R.A.* The interaction of matter and radiation in a hot model Universe // *Astrophys. and Space Sci.* 1969. Vol. 4. P. 285—300.
 39. *Peebles P.J.E., Wilkinson D.T.* Comment on the anisotropy of the primeval fireball // *Phys. Rev.* 1968. Vol. 174. P. 2168.
 40. *Sciama D.W.* Peculiar velocity of the Sun and the cosmic microwave background // *Phys. Rev. Lett.* 1967. Vol. 18. P. 1065—1067.
 41. *Steward J.M., Sciama D.W.* Peculiar velocity of the Sun and its relation to the cosmic microwave background // *Nature*. 1967. Vol. 216. P. 748—753.
 42. *Conklin E.K.* Velocity of the Earth with respect to the cosmic background radiation // *Ibid.* 1969. Vol. 222. P. 971—972.
 43. *Henry P.S.* Isotropy of the 3 K background // *Ibid.* 1971. Vol. 231. P. 516—518.
 44. *Cheng E.S., Saulson P.R., Wilkinson D.T.* et al. Large scale anisotropy in the 2, 7 K radiation // *Astrophys. J.* 1979. Vol. 232. P. L139—L143.
 45. *Smoot G.F., Gorenstein M.V., Miller R.A.* Anisotropy of the cosmic microwave background radiation // *Bull. Amer. Astron. Soc.* 1977. Vol. 9. P. 431.

46. Strukov I.A., Sagdeev R.Z., Kardashev N.S. et al. Eight mm. cartography of the sky using the cosmic radiotelescope "Relict" // Adv. Space Res.: Proc. COSPAR. Oxford etc.: Pergamon press, 1984. P. 17—24.
47. Lukash V.N., Naselsky P.D., Novikov I.D. Anisotropy of the relict radiation as a test of the early Universe theories // Proc. 3rd seminar on quantum gravity. Moscow, 1984. P. 675—689.
48. Lukash V.N. Anisotropy of the microwave background and cosmological dark matter // Proc. IAU symp. / Ed. J. Knapp, J. Kormendy. 1985. N 117. P. 379—392.
49. Conklin E.K., Bracewell R.N. Isotropy of cosmic background radiation at 10690 MHz // Phys. Rev. Lett. 1967. Vol. 18. P. 614.
50. Wilkinson D.T., Partridge R.B. Large scale density inhomogeneties in the Universe // Nature. 1967. Vol. 215. P. 719.
51. Сюняев Р.А., Зельдович Я.Б. Small scale fluctuations of relict radiation // Astrophys. and Space Sci. 1970. Vol. 7. P. 3—19.
52. Корольков Д.В., Парийский Ю.Н., Берлин А.Б. и др. Эксперимент "Холод". первый глубокий обзор неба на телескопе РАТАН-600 // Сообщ. САО АН СССР. 1984. N 41. С. 1—84.
53. Кардашев Н.С., Парийский Ю.Н., Умарбаева Н.Д. Возможность прямых измерений расстояний во Вселенной радио методами и "трехмерная" радио-астрономия // Астрофиз. исслед. 1973. N 5. С. 16—29.
54. Новиков И.Д. Об измерениях параллаксов объектов, находящихся на космологических расстояниях // Астрон. журн. 1977. Т. 54. С. 722—726.
- чения Луны // Там же. 1954. Т. 31. С. 511—528.
6. Кроти́ков В.Д. Учет усредняющего действия диаграммы направленности антенны при измерениях радиоизлучения Луны // Радиофизика. 1965. Т. 8. С. 453—460.
7. Алексеев В.А., Кроти́ков В.Д. Поляризация интегрального радиоизлучения Луны // Там же. 1968. Т. 11. С. 1135—1137. — Они же. Поляризационные характеристики радиоизлучения Луны при учете усредняющего действия диаграммы направленности ножевого типа // Там же. 1969. Т. 12. С. 5—8.
8. Алексеев В.А., Кроти́ков В.Д., Троицкий В.С. и др. Влияние шероховатости верхнего покрова Луны на излучательную способность и распределения радио яркости // Астрон. журн. 1967. Т. 44. С. 1070—1074.
9. Кроти́ков В.Д., Троицкий В.С. Радиоизлучение и природа Луны // УФН. 1963. Т. 81. С. 589—640. — Они же. Обнаружение потока тепла из недр Луны // Астрон. журн. 1963. Т. 40. С. 1076—1082. — То же // Радиофизика. 1963. Т. 6. С. 631—633.
10. Саломонович А.Е. Радиоизлучение Луны в миллиметровом диапазоне волн // Астрон. журн. 1958. Т. 35. С. 129—135.
11. Зелинская М.Р., Троицкий В.С., Федосеев Л.И. Радиоизлучение Луны на волне 1,63 см // Там же. 1959. Т. 36. С. 643—647.
12. Jaeger J.C. Thermal emission of the Moon // Austral. J. Phys. 1953. N 6. P. 355—360.
13. Кроти́ков В.Д., Шуко О.Б. К вопросу о тепловом режиме поверхностного слоя Луны во время лунаций // Астрон. журн. 1963. Т. 40. С. 297—303.
14. Рядов В.Я., Фурашов Н.И., Шаронов Г.А. Измерение собственного теплового излучения Луны в инфракрасном диапазоне волн // Там же. 1964. Т. 41. С. 112—115.
15. Троицкий В.С. Радиоизлучение Луны и природа ее поверхности // Тр. Пятого совещ. по вопр. космогонии, 9—12 марта 1955 г. М.: Изд-во АН СССР, 1956. С. 225—346.
16. Стрежнева К.М., Троицкий В.С. Фазовая зависимость радиоизлучения Луны на волне 3,2 см // Радиофизика. 1961. Т. 4. С. 600—607.
17. Кисляков А.Г. Результаты экспериментального исследования радиоизлучения Луны в четырехмиллиметровом

ГЛАВА 4

1. Piddington J.H., Minnett H.C. Radio-emission of the Moon // Austral. J. Sci. Res. 1949. Vol. 2. P. 63—70.
2. Очерки истории радиоастрономии в СССР. Киев: Наук. думка, 1985. 280 с.
3. Кайдановский Н.Л., Турусбеков Н.Т., Хайкин С.Э. Тепловое радиоизлучение Луны // Тр. Пятого совещ. по вопр. космогонии, 9—12 марта 1955 г. М.: Изд-во АН СССР, 1956. С. 347—355.
4. Троицкий В.С., Зелинский М.Р. Определение некоторых свойств поверхностных слоев Луны по ее радиоизлучению на волне 3,2 см // Астрон. журн. 1955. Т. 32. С. 550—554.
5. Троицкий В.С. К теории радиоизлу-

- диапазоне волн // Астрон. журн. 1961. Т. 28. С. 561—563. — То же // Новое о Луне. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1963. С. 380—386.
18. *Наумов А.И.* Радиоизлучение Луны и Солнца на волне 1,8 мм // Радиофизика. 1963. Т. 6. С. 848—849.
 19. *Федосеев Л.И.* Радиоизлучение Луны и Солнца на волне 1,3 мм // Там же. С. 656—659.
 20. *Федосеев Л.И., Лубяко Л.В., Кукин Л.М.* Измерение фазовой зависимости радиоизлучения Луны на субмиллиметровых волнах // Там же. 1968. Т. 11. С. 807—812.
 21. *Троицкий В.С.* Радиоизлучение Луны, физическое состояние и природа ее поверхности // Изв. комиссии по физике планет. 1961. N 3. С. 15—30. — То же/ Новое о Луне. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1963. С. 354—366.
 22. *Кротилов В.Д.* Некоторые электрические характеристики земных пород и их сравнение с характеристиками поверхностного слоя Луны // Радиофизика. 1962. Т. 5. С. 1057—1061.
 23. *Троицкий В.С.* Радиоизмерение диэлектрической проницаемости и плотности материала верхнего покрова Луны // Астрон. журн. 1961. Т. 38. С. 1001—1002.
 24. *Троицкий В.С.* Новая возможность определения плотности поверхностных пород Луны // Радиофизика. 1962. Т. 5. С. 885—891. — Он же. Природа и физическое состояние верхнего покрова Луны // Астрон. журн. 1962. Т. 39. С. 73—78. — Он же. К вопросу о неоднородности свойств верхнего покрова Луны в глубине и по поверхности // Там же. 1964. Т. 41. С. 724—732.
 25. *Кротилов В.Д., Порфирьев В.А., Троицкий В.С.* Разработка метода прецизионного измерения интенсивности поля и эталонирование радиоизлучения Луны на $\lambda = 3,2$ см // Радиофизика. 1961. Т. 4, N 4. С. 3—100; N 6. С. 1004—1012;
 26. *Troitskij V.S.* Investigation of the surfaces of the Moon and planets by the thermal radiation // Radio Sci. 1965. N 12. P. 1585—1611.
 27. *Троицкий В.С., Тихонова Т.В.* Тепловое излучение Луны и физические свойства ее верхнего покрова // Радиофизика. 1970. Т. 13. С. 1279—1311. — Они же. Результаты исследования поверхностного слоя Луны по ее собственному излучению // Современное представ-
 - ление о Луне. М.: Наука, 1972. С. 46—64.
 28. *Троицкий В.С.* Результаты исследования Луны по ее собственному излучению // Радиофизика. 1967. Т. 10. С. 1266—1282.
 29. *Шмелевич С.А., Троицкий В.С.* О зависимости диэлектрических свойств горных пород от их объемного веса // ДАН СССР. 1971. Т. 201. С. 593—594. — То же // J. Geophys. Res. 1973. Vol. 78. P. 241—243. На англ. яз.
 30. *Шмелевич С.А., Троицкий В.С., Зелинская М.Р.* и др. Диэлектрические свойства горных пород на частоте 500 МГц // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1971. N 12. С. 68—76.
 31. *Бондарь Л.Н., Зелинская М.Р., Троицкий В.С.* и др. Оценка химического состава лунного вещества по радиоастрономическим наблюдениям // Астрон. вестн. 1969. Т. 3. С. 191—198.
 32. *Troitskij V.S., Bondar' L.N., Zelinskaja M.R.* et al. Comparison of the chemical composition of lunar surface material determined by radioastronomical observations with the results of chemical analysis obtained by Surveyor // Radio Sci. 1970. Vol. 5. P. 247—251.
 33. *Троицкий В.С., Бондарь Л.Н., Стрежнева К.М.* Вариационные диаграммы диэлектрико-химических свойств силикатных пород // ДАН СССР. 1973. Т. 208. С. 837—840.
 34. *Троицкий В.С., Цейтлин Н.М.* Метод измерения диэлектрической постоянной лунной породы // Радиофизика. 1960. Т. 3. С. 1122—1123.
 35. *Соболева Н.С.* Поляризация радиоизлучения Луны на волне 3,2 см // Астрон. журн. 1962. Т. 39. С. 1124—1128.
 36. *Саломонович А.Е., Лосовский Б.Я.* Наблюдения распределения радиояркости по диску Луны на волне 0,8 см // Там же. С. 1074—1082.
 37. *Каменская С.А., Кисляков А.Г., Кротилов В.Д.* и др. Наблюдение радиозатмений Луны на миллиметровых волнах // Радиофизика. 1965. Т. 8. С. 219—226.
 38. *Троицкий В.С.* Радиоизлучение затменной Луны // Астрон. журн. 1965. Т. 42. С. 1296—1309.
 39. *Матвеев Ю.Т., Сучкин Г.Л., Троицкий В.С.* Об измерении плотности лунита в глубине в приповерхностном слое // Там же. С. 810—816.
 40. *Тихонова Т.В., Троицкий В.С.* Спектр коэффициента отражения радиоволн от поверхности Луны при изменении

- свойств вещества в глубину // Там же. С. 1324—1328.
41. Тихонова Т.В., Троицкий В.С. Влияние потока тепла из недр Луны на ее радиоизлучение при изменении свойств вещества в глубину // Там же. 1969. Т. 46. С. 159—171.
 42. Троицкий В.С., Орнатская О.И., Цейтлин Н.М. и др. Расчеты тепловой истории Луны при наиболее вероятных концентрациях радиоактивных элементов // ДАН СССР. 1976. Т. 230. С. 1445—1447.
 43. Троицкий В.С. Эффективная толщина радиоактивного слоя Луны // Астрон. журн. 1970. Т. 4. С. 222—225.
 44. Троицкий В.С. Определение температурной зависимости теплопроводности лунита // Радиофизика. 1967. Т. 10. С. 1051—1057.
 - 44a. Troitskij V.S. Thermal conductivity of lunite is dependent on temperature // Nature. 1967. N 18. P. 658—659.
 45. Troitskij V.S. The problem of the thermal conductivity equation in the presence of radiative energy transfer // Philos. Trans. Roy. Soc. London A. 1969. Vol. 264. P. 145—149.
 46. Troitskij V.S., Burov A.B., Alyoshina T.N. Influence of the temperature dependence of lunar material properties on the spectrum of the Moon's radio emission // Icarus. 1968. Vol. 8. P. 423—433.
 47. Основные результаты исследования физических свойств верхнего покрова Луны // Отчет НИРФИ. Горький, 1966. Учет. номер 349/0.
 48. Лосовский Б.Я., Саломонович А.Е. О радиоизлучении и различиях верхнего покрова "морских" и "материковых" областей Луны // Астрон. журн. 1965. Т. 42. С. 390—397.
 49. Троицкий В.С. О природе вещества лунных морей и материков // Радиофизика. 1963. Т. 6. С. 631—633.
 50. Троицкий В.С., Кротилов В.Д. Сравнение результатов радиоастрономических и прямых исследований Луны // Астрон. вестн. 1988. N 3. С. 10—18.
 3. Mayer C.H., McCullough T.P., Sloanaker R.M. Observations of Venus at 10,2 cm wavelength // Astron. J. 1960. Vol. 65. P. 349—350.
 4. Gibson J.E., McEwen R.Y. The brightness temperature of Venus at 8.6 mm // Paris symp. on radio astron. P., 1959.
 5. Sagan C. The radiation balance of Venus // JPL Techn. Rept. 1960. N 32—34. 67 p.
 6. Jones D.E. The microwave temperature of Venus // Planet. and Space Sci. 1961. Vol. 5. P. 166—167.
 7. Кисляков А.Г., Кузьмин А.Д., Саломонович А.Е. Радиоизлучение Венеры на волне 4 мм // Изв. вузов. Радиофизика. 1961. Т. 4. С. 573—574. — То же // Астрон. журн. 1962. Т. 39. С. 410—417.
 8. Кузьмин А.Д., Саломонович А.Е. Наблюдения радиоизлучения Венеры и Юпитера на волне 8 мм // Астрон. журн. 1962. Т. 39. С. 660—668.
 9. Ветуховская Ю.Н., Кузьмин А.Д., Кутуза Б.Г. и др. Измерение спектра радиоизлучения ночной стороны Венеры в сантиметровом диапазоне волн // Изв. вузов. Радиофизика. 1963. Т. 6. С. 1054—1056.
 10. Бибинова В.П., Кузьмин А.Д., Саломонович А.Е. и др. Наблюдения радиоизлучения Венеры и Юпитера на волне 3,3 см // Астрон. журн. 1962. Т. 39. С. 1083—1088.
 11. Кузьмин А.Д., Саломонович А.Е. Результаты наблюдений радиоизлучения Венеры в 1961 г. // Там же. 1961. Т. 38. С. 1115—1117.
 12. Корольков Д.В., Парийский Ю.Н., Тимофеева Ю.Н. и др. Радиоастрономические наблюдения Венеры с высокой разрешающей способностью // ДАН СССР. 1963. Т. 149. С. 65—67.
 13. Clark B.G., Spencer C.L. Some decimeter observations of Venus during the 1962 conjunction // Astron. J. 1964. Vol. 69. P. 59—61.
 14. Barath F.T., Barrett A.H., Copeland J. et al. Mariner-2 microwave experiment and results // Ibid. P. 49—58.
 15. Кузьмин А.Д., Кларк Б.Дж. Измерение поляризации и распределения яркостной температуры Венеры на волне 10,6 см // Астрон. журн. 1965. Т. 43. С. 595—617.
 16. Кузьмин А.Д., Маров М.Я. Физика планеты Венера. М.: Наука, 1974. 408 с.
 17. Смирнова Т.В., Кузьмин А.Д. Оценка содержания водяного пара и аммиака в нижней атмосфере Венеры по радио-

ГЛАВА 5

1. Кузьмин А.Д., Саломонович А.Е. Радиоизлучение Венеры в 8-мм диапазоне волн // Астрон. журн. 1960. Т. 37. С. 297—300.
2. Mayer C.H., McCullough T.P., Sloanaker R.M. Observation of Venus at 3,15 cm wavelength // Astrophys. J. 1958. Vol. 127. P. 1—10.

- локационным измерениям // Астрон. журн. 1974. Т. 51. С. 607—609.
18. Kuzmin A.D. Radio astronomical studies of Venus // Venus. Univ. Ariz. press, 1983. P. 36—44.
 19. Кузьмин А.Д. Измерения яркостной температуры освещенной Солнцем стороны Венеры на волне 10,6 см // Астрон. журн. 1965. Т. 42. С. 1281—1286.
 20. Drake F.D. 10-cm observations of Venus near superior conjunction // Nature. 1962. Vol 195. P. 894.
 21. Kellerman K.I. The thermal radio emission from Mercury, Venus, Mars, Saturn and Uranus // Icarus. 1966. Vol. 5. P. 478—490.
 22. Кузьмин А.Д., Ветухновская Ю.Н. "Венера-4" и интерпретация радиоастрономических измерений Венеры // Космич. исслед. 1968. Т. 6. С. 590—597.
 23. Кутуза Б.Г., Лосовский Б.Я., Саломонович А.Е. Измерения радиоизлучения Меркурия на волне 8 мм // Астрон. циркуляр. 1965. N 327. С. 5.
 24. Головкин В.К., Лосовский Б.Я. Измерения фазовой зависимости радиоизлучения Меркурия на волне 0,8 см и некоторые характеристики его поверхностного слоя // Астрон. журн. 1968. Т. 45. С. 378—381.
 25. Троицкий В.С. К теории радиоизлучения Луны // Там же. 1954. Т. 31. С. 511—528.
 26. Ветухновская Ю.Н., Кузьмин А.Д. Планета Меркурий // Астрон. вестн. 1967. Т. 1. С. 198—212.
 27. Ветухновская Ю.Н., Кузьмин А.Д. К теории радиоизлучения Меркурия // Там же. 1968. Т. 2. С. 65—71.
 28. Кротиков В.Д., Шуко О.Б. О тепловом режиме верхнего покрова Меркурия // Астрон. журн. 1975. Т. 52. С. 146—151.
 29. Афанасьева П.М., Фомин В.А. Определение прямых восхождений Меркурия на радиотелескопе РАТАН-600 // Письма в "Астрон. журн." 1978. Т. 4. С. 328—330.
 30. Кутуза Б.Г., Лосовский Б.Я., Саломонович А.Е. Наблюдения радиоизлучения Марса на волне 8 мм // Астрон. журн. 1966. Т. 43. С. 236—237.
 31. Троицкий В.С. О возможности исследования свойств вещества Марса по его радиоизлучению // Там же. 1970. Т. 47. С. 384—391.
 32. Ветухновская Ю.Н., Кузьмин А.Д., Лосовский Б.Я. Измерения радиоизлучения Марса на волне 8,2 мм и оценка тепловых и электрических параметров поверхности планеты // Астрон. вестн. 1970. Т. 4. С. 231—240.
 33. Ветухновская Ю.Н., Кузьмин А.Д., Лосовский Б.Я. Определение диэлектрических потерь материала поверхности Марса по его радиоизлучению в миллиметровом диапазоне // Астрон. журн. 1974. Т. 51. С. 413—416.
 34. Ефанов В.А., Кисляков А.Г., Моисеев И.Г. и др. Отношение яркостных температур Марса и Юпитера на волнах 2,35 и 8,15 мм // Изв. вузов. Радиофизика. 1974. Т. 17. С. 185—191.
 35. Basharinov A.E., Drozdovskaya I.B., Egorov S.T. et al. Microstructure radiometry of Mars from Mars-2 and -3 orbiters: (Preliminary results) // Icarus. 1972. Vol. 17. P. 540—542.
 36. Башаринов А.Е., Ветухновская Ю.Н., Галактионов В.Н. и др. Результаты наблюдения радиоизлучения планеты Марс по данным эксперимента на АМС "Марс-3" // Космич. исслед. 1973. Т. 11. С. 803—806.
 37. Basharinov A.E., Egorov S.T., Galaktionov V.N. et al. Radioastronomical measurements from Mars-5 // Space research. B.: Akad.-Verl., 1976. P. 989—992.
 38. Кузьмин С.О., Лосовский Б.Я. О радиометрической неоднородности поверхности Марса в миллиметровом диапазоне волн // Астрон. вестн. 1983. Т. 17. С. 153—159.
 39. Корольков Д.В., Парийский Ю.Н., Тимофеева Г.М. Радиоастрономические наблюдения Юпитера с высокой разрешающей способностью // Астрон. циркуляр. 1964. N 283. С. 1.
 40. Гольнев В.Я., Липовка Н.М., Парийский Ю.Н. Наблюдения радиоизлучения Юпитера на волне 6,5 см в Пулковске // ДАН СССР. 1964. Т. 157. С. 554—556.
 41. Соболева Н.С., Тимофеева Г.М. Результаты наблюдений в Пулковке на волне 3,95 см // Астрон. журн. 1969. Т. 46. С. 872—876.
 42. Парийский Ю.Н. Атмосфера Юпитера по радионаблюдениям // Там же. 1971. Т. 47. С. 163—165.
 43. Кузьмин А.Д., Смирнова Т.В. Оценка содержания аммиака в подоблачной атмосфере Юпитера по радиоастрономическим данным // Астрон. вест. 1973. Т. 7. С. 139—141.
 44. Артюх В.С., Кузьмин А.Д., Макаров А.Н. Измерения радиоизлучения Юпитера на волне 2,94 м // Астрон. журн. 1972. Т. 49. С. 456—458.
 45. Лосовский Б.Я., Соловьев А.Г. Изме-

рения радиоизлучения Юпитера в метровом диапазоне волн // Тр. ФИАН. 1985. Т. 159. С. 120—123.

ГЛАВА 6

46. Соловьев А.Г., Лосовский Б.Я. Оценка степени линейной поляризации радиоизлучения Юпитера на волне $\lambda = 3$ м // Там же. С. 123—127.
47. Соловьев А.Г. Оценка параметров внутренней магнитосферы Юпитера по радиоастрономическим данным // Там же. С. 128—139.
48. Bigg E.L. Influence of the satellite Io on Jupiter's decametric emission // Nature. 1964. Vol. 203. P. 1008—1009.
49. Рябов Б.П., Архипов А.В., Шевченко В.А. Декаметровое радиоизлучение Юпитера. I. Морфология S-бурь // Астрон. вестн. 1985. Т. 19. С. 296—318.
50. Рябов Б.П. Декаметровое радиоизлучение Юпитера. II. Локализация области генерации S-бурь // Там же. 1986. Т. 20. С. 20—34.
51. Зайцев В.В., Злотник Е.Я., Шапошников В.Е. К теории S-всплесков декаметрового радиоизлучения Юпитера // Письма в "Астрон. журн." 1985. Т. 11. С. 208—215.
52. Кутуза Б.Г., Лосовский Б.Я., Саломонович А.Е. Радиоизлучение Сатурна на волне 8,2 мм // ДАН СССР. 1965. Т. 161. С. 1301—1302.
53. Кузьмин А.Д., Наумов А.П., Смирнова Т.В. Оценка содержания аммиака в подоблачной атмосфере Сатурна по радиоастрономическим измерениям // Астрон. вестн. 1972. Т. 6. С. 13—18.
54. Кузьмин А.Д., Лосовский Б.Я. Измерения радиоизлучения Урана на волне 8,22 мм и некоторые свойства его атмосферы // Там же. 1971. Т. 5. С. 23—26. — То же // Icarus. 1971. Vol. 14. P. 196—197. На англ. яз.
55. Кузьмин А.Д., Лосовский Б.Я. Измерения радиоизлучения спутника Юпитера Каллисто // ДАН СССР. 1973. Т. 211. С. 804—805.
56. Кузьмин А.Д., Лосовский Б.Я. О радиоизлучении Каллисто // Астрон. вестн. 1972. Т. 6. С. 177—179.
57. Берлин А.Б., Есепкина Н.А., Зверев Ю.Н. и др. Наблюдения галилеевских спутников Юпитера на РАТАН-600 // Письма в "Астрон. журн." 1976. Т. 2. С. 405—409.
58. Мингалиев М.Г., Парийский Ю.Н., Петров З.Е. Обнаружение радиоизлучения Ио: пояса радиации? // Там же. 1979. Т. 5. С. 622—624.
1. Папалексис Н.Д. Об измерении расстояния между Землей и Луной с помощью электромагнитных волн // УФН. 1946. Т. 29. С. 250—259.
2. Кобрин М.М. Радиоэххо от Луны на волнах 3 и 10 см // РЭ. 1959. Т. 4. С. 892—894.
3. Кутуза Б.Г., Ржига О.Н. Радиофизические исследования планет и Земли в Институте радиотехники и электроники АН СССР // Очерки истории радиоастрономии в СССР. Киев: Наук. думка. 1985. С. 234—255.
4. Котельников В.А., Дубровин В.М., Морозов В.А. и др. Результаты радиолокации Венеры в 1961 г. // РЭ. 1962. Т. 7. С. 1860—1872.
5. Котельников В.А., Дубровин В.М., Дубинский Б.А. и др. Радиолокационные наблюдения Венеры в Советском Союзе в 1962 г. // ДАН СССР. 1963. Т. 151. С. 532—535.
6. Rzhiga O.N. Radar observation of Venus in the Soviet Union in 1962: Paper presented to IV Intern. symp. COSPAR, Warsaw, 1963 // Life sciences and space research. Amsterdam: North-Holland, 1964. Vol. 2. P. 178—187.
7. Котельников В.А., Гусков Г.Я., Дубровин В.М. и др. Радиолокация планеты Меркурий // ДАН СССР. 1962. Т. 147. С. 1320—1323.
8. Котельников В.А., Дубровин В.М., Дубинский Б.А. и др. Радиолокация планеты Марс в Советском Союзе // Там же. 1963. Т. 151. С. 811—814.
9. Котельников В.А., Апраксин Л.В., Дубровин В.М. и др. Радиолокация планеты Юпитер // Там же. 1964. Т. 155. С. 1037—1038.
10. Александров Ю.Н., Зятицкий В.А., Ржига О.Н. Особенности спектра отраженных Венерой радиоволн // Астрон. журн. 1967. Т. 44. С. 1060—1064.
11. Kotelnikov V.A., Alexandrov Ju.N., Golovkov V.K. et al. The joint Soviet-English radar observations of Venus: Paper presented to XIII General assembly IAU. Prague, 1967. 14 p.
12. Головков В.К. Определение элементов вращения Венеры и координат областей поверхности с повышенной отражательной способностью в радиодиапазоне: Докл. на Междунар. симпоз. по физике Луны и планет, Киев, 1968 // Физика Луны и планет. М.: Наука, 1972. С. 314—319.
13. Александров Ю.Н., Головков В.К., Дуб-

- ровин В.М. и др. Радиолокационные исследования рельефа и отражательных свойств поверхности Венеры на волне 39 см // Астрон. журн. 1980. Т. 57. С. 237—249.
14. Александров Ю.Н., Вышлов А.С., Дубровин В.М. и др. Радиолокационные наблюдения Марса, Венеры и Меркурия на волне 39 см в 1980 г. // ДАН СССР. 1980. Т. 255. С. 1334—1338.
 15. Кислик М.Д., Колюка Ю.Ф., Котельников В.А. и др. Единая релятивистская теория движения внутренних планет Солнечной системы // Там же. С. 545—547.
 16. Александров Ю.Н., Базилевский А.Т., Котельников В.А. и др. Вновь открытая планета: (Радиолокационные исследования Венеры с космических аппаратов "Венера-15" и "Венера-16") // Итоги науки и техники. Астрономия. М.: ВИНТИ, 1987. Т. 32. С. 201—234.
 17. Александров Ю.Н. Развитие цифровых методов спектральных измерений отраженных сигналов при радиолокации планет: Дис. ... канд. техн. наук. М., 1972. 163 с.
 18. Evans J.V., Pettengill G.H. The scattering behavior of the Moon at wavelengths of 3.6, 68 and 784 centimeters // J. Geophys. Res. 1963. Vol. 68. P. 423—447.
 19. Evans I.V., Brockelman R.A., Henry I.C. et al. Radio echo observations of Venus and Mercury at 23-cm wavelength // Astron. J. 1965. Vol. 70. P. 486—501.
 20. Исакович М.А. Рассеяние волн от статистически шероховатой поверхности // ЖЭТФ. 1952. Т. 23. С. 305—314.
 21. Hagfors T. Backscattering from an undulating surface with applications to radar returns from the Moon // J. Geophys. Res. 1964. Vol. 69. P. 3779—3784.
 22. Александров Ю.Н., Кузнецов Б.И., Ржига О.Н. Исследование диаграммы обратного рассеяния Венеры на волне 40 см // Астрон. журн. 1968. Т. 45. С. 371—377.
 23. Ржига О.Н. Развитие методики и некоторые результаты исследования физической природы планет при помощи радиолокации: Дис. ... д-ра физ.-мат. наук. М., 1971. 252 с.
 24. Beckmann P., Klemperer W.K. Interpretation of the angular dependence of backscattering from the Moon and Venus // Radio Sci. D. 1965. Vol. 69. P. 1669—1676.
 25. Evans J.V. Radar studies of the Moon // Ibid. P. 1637—1659.
 26. Carpenter R.L. Study of Venus by CW Radar-1964 results // Astron. J. 1966. Vol. 71. P. 142—152.
 27. Котельников В.А., Александров Ю.Н., Апраксин Л.В. и др. Радиолокационные наблюдения Венеры в Советском Союзе в 1964 г. // ДАН СССР. 1965. Т. 163. С. 50—53.
 28. Шаронов В.В. Природа планет. М.: Физматгиз, 1958. 552 с.
 29. Сытинская Н.Н. Природа Луны. М.: Физматгиз, 1959. 176 с.
 30. Александров Ю.Н., Ржига О.Н. Учет диффузного рассеяния при определении коэффициента отражения поверхности планет из радиолокационных наблюдений // Астрон. журн. 1968. Т. 45. С. 616—621.
 31. Кузьмин А.Д. Радиофизические исследования Венеры. М.: ВИНТИ, 1967. 176 с.
 32. Karp D., Morrow W.E., Smith W.B. Radar observations of Venus at 3,6 centimeters // Icarus. 1964. Vol. 3. P. 473—476.
 33. Evans J.V., Ingalls R.P., Rainville L.P., Silva R.R. Radar observations of Venus at 3,8-cm wavelengths // Astron. J. 1966. Vol. 71. P. 902—915.
 34. Александров Ю.Н. Анализ отраженных сигналов, полученных при радиолокации Венеры с применением ЭЦВМ: Докл. на Междунар. симпоз. по физике Луны и планет, Киев, 1968 // Физика Луны и планет. М.: Наука, 1972. С. 309—314.
 35. Виноградов А.П., Сурков Ю.А. и др. Определение химического состава атмосферы Венеры межпланетной станцией "Венера-4" // ДАН СССР. 1968. Т. 179. С. 37—40.
 36. Виноградов А.П., Сурков Ю.А., Андрейчиков Б.М. Исследование состава атмосферы Венеры на автоматических станциях "Венера-5" и "Венера-6" // Там же. 1970. Т. 190. С. 552—554.
 37. Newell A.C., Baird R.C. Absolute determination of refractive indexes of gases at 47,7 Gigahertz // J. Appl. Phys. 1965. Vol. 36. P. 3751—3759.
 38. Avduesky V.S., Marov M.Ja., Rozhdestvensky M.K. The tentative model of the atmosphere of the planet Venus based on the results of measurements of space probes Venera-5 and Venera-6 // J. Atmos. Sci., 1970. Vol. 27. P. 561—565.
 39. Маров М.Я., Авдуевский В.С., Рождественский М.К. и др. Предварительные результаты исследования атмосферы Венеры при помощи АМС "Венера-7" // Космич. исслед. 1971. Т. 9. С. 570—579.
 40. Маров М.Я., Авдуевский В.С., Кер-

- жанович В.В. и др. Измерения температуры, давления и скорости ветра в атмосфере Венеры на автоматической межпланетной станции "Венера-8" // ДАН СССР. 1971. Т. 210. С. 559—562.
41. Ржигза О.Н. Анализ спектра яркостной температуры и структура нижней атмосферы Венеры // Астрон. журн. 1970. Т. 47. С. 566—576.
 42. Smith E.K., Weintraub S. The constants in the equation for atmospheric refractive index at radio frequencies // Proc. IRE. 1953. Vol. 41. P. 1035—1037.
 43. Masursky H., Eliason E., Ford P.G. et al. Pioneer Venus radar results: Geology from images and altimetry // J. Geophys. Res. 1980. Vol. 85. P. 8232—8260.
 44. Campbell D.B., Burns B.A. Earth-based radar imagery of Venus // Ibid. P. 8271—8281.
 45. Goldstein R.M., Green R.R., Rumsey H.C. Venus radar images // Ibid. 1976. Vol. 81. P. 4807—4817.
 46. Jurgens R.F., Goldstein R.M., Rumsey H.R., Green R.R. Images of Venus by three-station radar interferometry — 1977 results // Ibid. 1980. Vol. 85. P. 8282—8294.
 47. Pettengill G.H., Counselman C.C., Rainville L.P., Shapiro I.I. Radar measurements of martian topography // Astron. J. 1969. Vol. 74. P. 461—482.
 48. Фенслер В.Е., Ном Е.Ф. и др. Электромагнитные параметры некоторых земных и внеземных горных пород и стекол // Новое о Луне. М.: Изд-во АН СССР, 1963. С. 408—424.
 49. Кротиков В.Д. Некоторые электрические характеристики земных пород и их сравнение с характеристиками поверхностного слоя Луны // Изв. вузов. Радиофизика. 1962. Т. 5. С. 1057—1061.
 50. Башмашников М.В., Гусляков В.Т., Ежков В.М. и др. Характеристики поверхности Венеры, измеренные радиовысотомером в районе посадки спускаемого аппарата АМС "Венера-8" // Космич. исслед. 1976. Т. 14. С. 111—114.
 51. Сурков В.А., Кирнозов Ф.Ф., Христианов В.К. и др. Плотность поверхностной породы Венеры по данным АМС "Венера-10" // Там же. С. 697—703.
 52. Alexandrov Ju.N., Kotelnikov V.A., Krymov A.A. et al. Venus: Detailed mapping of Maxwell Montes region // Science. 1986. Vol. 231. P. 1271—1273.
 53. Campbell D.B. Recent Arecibo radar observations: Paper presented to XXV Meeting COSPAR. Graz, 1984.
 54. Pettengill G.H., Ford P.G., Nozette S. Venus: Global surface radio reflectivity // Science. 1982. Vol. 217. P. 640—643.
 55. Ford P.G., Pettengill G.H. Venus: Global surface radio emissivity // Ibid. 1983. Vol. 220. P. 1379—1381.
 56. Богомолов А.Ф., Назаркин В.А., Еремеев В.И. и др. Предварительные данные по радиометрическому исследованию поверхностного слоя северного полушария планеты Венера орбитальными станциями "Венера-15" и "Венера-16" // Астрон. циркуляр. 1984. N 1333. С. 3—4.
 57. Kotelnikov V.A., Bogomolov A.F., Rzhigza O.N. Radar study of Venus surface by Venera-15 and -16 spacecraft // Adv. Space Res. 1985. Vol. 5. P. 5—16.
 58. Carpenter R.L. Study of Venus by CW radar // Astron. J. 1964. Vol. 69. P. 2—11.
 59. Goldstein R.M. Preliminary Venus radar results // Radio Sci. D. 1965. Vol. 69. P. 1621—1623.
 60. Котельников В.А., Кислик М.Д., Петров Г.М. и др. Радиолокация планет и уточнение астрономических постоянных // Проблемы современной радиотехники и электроники. М.: ИРЭ АН СССР, 1978. Т. 1. С. 47—84.
 61. Shapiro I.I., Campbell D.B., Campa W.M.de. Nonresonance rotation of Venus? // Astrophys. J. Lett. 1979. Vol. 230. P. L123—L126.

ГЛАВА 7

1. Гиндилус Л.М. Радиоастрономия и поиски внеземных цивилизаций. Развитие исследований в СССР // Тр. ГАИШ. 1986. Т. 58. С. 87—118.
2. Cocconi G., Morrison P. Searching for interstellar communications // Nature. 1959. Vol. 184. P. 844—846.
3. Drake F.D. How can we detect radio transmission from distant planetary systems? // Sky and Telescope. 1960. Vol. 19. P. 140—143.
4. Bracewell R.N. Communication from superior galactic communities // Nature. 1960. Vol. 186. P. 670—671.
5. Dyson F.J. Search for artificial stellar sources of infrared radiation // Science. 1960. Vol. 131. P. 1667—1668.
6. Dyson F.J. Artificial biosphere // Correspondence Sci. 1960. Vol. 132. P. 252—253.
7. Hoerner S.von. The search for signals

- from other civilizations // Science. 1961. Vol. 134. P. 1839—1843.
8. Interstellar communication / Ed. A. G. W. Cameron. N.Y.: Benjamin, 1963. 320 p.
9. Межзвездная связь. М.: Мир, 1965. 324 с.
10. Шкловский И.С. Вселенная. Жизнь. Разум. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 240 с.
11. Кардашев Н.С. Передача информации внеземными цивилизациями // Астрон. журн. 1964. Т. 41. С. 282—287.
12. Гиндилис Л.М. Проблема внеземных цивилизаций // Вестн. АН СССР. 1964. N 9. С. 118—120. — Он же. Совещание по внеземным цивилизациям // Астрон. журн. 1965. Т. 42. С. 469—470.
13. Внеземные цивилизации: Тр. совещ., Бюракан, 20—23 мая 1964 г. Ереван: Изд-во АН АрмССР, 1965. 152 с.
14. Extraterrestrial civilizations: Proc. of the First All-Union conf. on extraterrestrial civilizations and interstellar communication (Byurakan, USSR, May 20—23, 1964) / Ed. G.M. Tovmasyan // NASA Sci. and Techn. Inform. Facility Transl.; N 67-30330 throug N 67-30342).
15. Котельников В.А. Связь с внеземными цивилизациями в радиодиапазоне // Внеземные цивилизации. Ереван: Изд-во АН АрмССР, 1965. С. 113—120.
16. Троицкий В.С. Некоторые соображения о поисках разумных сигналов из Вселенной // Там же. С. 97—112.
17. Кардашев Н.С. Передача информации внеземными цивилизациями // Там же. С. 37—60.
18. Троицкий В.С., Стародубцев А.М., Герштейн Л.И. и др. Опыт поиска монохроматического радиоизлучения от звезд в окрестностях Солнца на частоте 927 МГц // Астрон. журн. 1971. Т. 48. С. 645—647.
19. Гиндилис Л.М. О применении широкополосных импульсных сигналов в системе межзвездной связи // Первая науч.-техн. конф. по космич. радиосвязи, посвящ. десятилетию космич. эры: Тез. докл. М.: НТОРЭС им. А.С. Попова, 1968. С. 225—227.
20. Гиндилис Л.М. Применение импульсов с компенсирующими задержками в качестве позывных СЕТИ // Изв. вузов. Радиофизика. 1973. Т. 16. С. 1448—1451. — См. также. Проблема СЕТИ. М.: Мир, 1975. С. 238—253.
21. Петрович Н.Т. Выступление на Первой советско-американской конференции по проблеме СЕТИ, Бюракан, сентябрь 1971 // Проблема СЕТИ. М.: Мир, 1975. С. 253—257.
22. Троицкий В.С. Выступление на Первой советско-американской конференции по проблеме СЕТИ // Там же. С. 220—235.
23. Troitsky V.S. Scanning of sporadic radiation resulting from technical activity of extraterrestrial civilizations // Proc. 24th IAE Congr., Baku, USSR, Oct. 7—13, 1973: (2nd Intern. Rev. Meet. on Communication with Extraterrestrial Intelligence.) — См. также. Troitskii V.S., Starodubtsev A.M., Bondar L.N. Search for radio emission from extraterrestrial civilizations // Acta astronaut. 1979. Vol. 6. P. 81—94.
24. Троицкий В.С., Стародубцев А.М., Бондарь Л.Н. и др. Поиск спорадического радиоизлучения из Космоса на сантиметровых и дециметровых волнах // Изв. вузов. Радиофизика. 1973. Т. 16. С. 323—341.
25. Троицкий В.С., Бондарь Л.Н., Стародубцев А.М. и др. Новый тип радиосуммов. Спорадическое радиоизлучение околоземной среды на сантиметровых и дециметровых волнах // ДАН СССР. 1973. Т. 212. С. 607—610.
26. Троицкий В.С., Бондарь Л.Н., Стародубцев А.М. Поиски спорадического радиоизлучения из Космоса // УФН. 1974. Т. 113. С. 719—723.
27. Очерки истории радиоастрономии в СССР. Киев: Наук. думка, 1965. 280 с.
28. Scholomitskii G.B. Variability of the radiSOURCE CTA-102 // IAU Inform. Variable Stars. 1965. N 83.
29. Шоломицкий Г.Б. Флуктуации потока СТА-102 на волне 32,5 см // Астрон. журн. 1965. Т. 42. С. 673—674.
30. Шоломицкий Г.Б. Вариации потока радиоизлучения СТА-102 на частоте 920 МГц // Астрон. циркуляр. 1966. N 359. С. 1—4.
31. Голей М. Когерентность разумных сигналов // Межзвездная связь. М.: Мир. 1965. С. 212—219.
32. Слыш В.И. Радиоастрономические критерии искусственных радиосистем // Внезапные цивилизации. Ереван: Изд-во АН АрмССР, 1965. С. 61—67.
33. Гудзенко Л.И., Пановкин Б.Н. К вопросу о приеме сигналов внеземных цивилизаций // Там же. С. 68—71.
34. Сифоров В.И. Некоторые вопросы поиска и анализа радиоизлучений от других цивилизаций // Там же. С. 121.

35. Пащенко М.И., Рудницкий Г.М., Слыш В.И. и др. Измерение одномерной функции распределения сигнала галактических источников ОН // Астрон. циркуляр. 1971. N 626. С. 1—3.
36. Сухотин Б.В. Методы дешифровки сообщений // Внеземные цивилизации: Проблемы межзвездной связи. М.: Наука, 1969. С. 222—352.
37. Пановкин Б.Н. Некоторые общие вопросы проблемы внеземных цивилизаций // Там же. С. 391—437.
38. Пановкин Б.Н. Внеземные цивилизации — проблемы и суждения // Природа. 1971. N 7. С. 56—61.
39. Кардашев Н.С. Астрофизический аспект проблемы поиска сигналов внеземных цивилизаций // Внеземные цивилизации: Проблемы межзвездной связи. М.: Наука, 1969. С. 25—101.
40. Kardashev N.S. Optimal wavelength region for CETI: 1,5 mm // Nature. 1979. Vol. 278. P. 28—30.
41. Внеземные цивилизации: Проблемы межзвездной связи / Л.М. Гиндлис, С.А. Каплан, Н.С. Кардашев и др.; Под ред. С.А. Каплана. М.: Наука, 1969. 439 с.
42. Extraterrestrial civilizations: Problems of interstellar communication: Transl. from Russ. / Ed. S.A. Kaplan. Wash. (D.C.); Jerusalem: Isr. Program for Sci. Transl., 1971. 265 p.
43. Gindilis L.M., Kaplan S.A., Kardashev N.S. et al. Mimoszemské civilizace: Problémy mezihvězdného spojení / Red. S.A. Kaplan. Praha: Academia, 1972. 311 p.
44. Гиндilis Л.М. Проблема связи с внеземными цивилизациями // Вестн. АН СССР. 1972. N 3. С. 82—88. — Он же. CETI-71 // Земля и Вселенная. 1972. N 2. С. 49—53; N 3. С. 48—55.
45. Communication with extraterrestrial intelligence / Ed. C. Sagan. Cambridge (Mass): MIT press, 1973. 428 p.
46. Проблема CETI: (Связь с внеземными цивилизациями). М.: Мир, 1975. 352 с.
47. Резолюция Первой советско-американской конференции по внеземным цивилизациям (ВЦ) // Астрон. циркуляр. 1971. N 653. С. 1—5.
48. Анкета CETI // Земля и Вселенная. 1972. N 4. С. 57—61.
49. Pešek R. Survey of CETI activities up to present // Astronaut. acta. 1973. Vol. 18. P. 411—419.
50. Гиндilis Л.М. Поиски сигналов внеземных цивилизаций // Земля и Вселенная. 1986. N 6. С. 18—28.
51. Рубцов В.В. Некоторые результаты наукометрического анализа литературы по проблеме внеземных цивилизаций // Проблема поиска жизни во Вселенной. М.: Наука, 1986. С. 236—242.
52. Программа исследований по проблеме связи с внеземными цивилизациями // АН СССР. Науч. совет по комплекс. пробл. "Радиоастрономия". М., 1974. 47 с.
53. Программа CETI // Астрон. журн. 1974. Т. 51. С. 1125—1132.
54. The Soviet CETI programme // Icarus. 1975. Vol. 26. P. 377—385.
55. USSR research programme on the problem of communication with extraterrestrial civilizations // J. Brit. Interplanet. Soc. 1975. Vol. 28. P. 751—760.
56. SETI: The search for extraterrestrial intelligence / Ed. P. Morrison et al. Wash. (D.C.), 1977. 276 p. (NASA; N SP-419).
57. Бондарь Л.Н., Стрешнева К.М., Троицкий В.С. Спорадическое радиоизлучение фона, солнечная активность и полярные сияния // Астрон. вестн. 1975. Т. 9. С. 210—217.
58. Gindilis L.M., Kardashev N.S., Mirovsky V.G. et al. Search for signals from extraterrestrial civilizations by the method of synchronous dispersion reception // Proc. 24th IAF Congr., Baku, USSR, Oct. 7—13, 1973: (2nd Intern. Rev. Meet. on CETI) // Acta astronaut. 1979. Vol. 6. P. 95—104.
59. Кардашев Н.С., Согласнов В.А., Савельева Н.А. и др. Поиск моноимпульсных сигналов от астрономических объектов // Астрон. журн. 1977. Т. 54. С. 3—17.
60. Пащенко М.И., Рудницкий Г.М., Слыш В.И. Исследование плотности вероятности сигнала межзвездных радиолиний гидроксила // Изв. вузов. Радиофизика. 1973. Т. 16. С. 1344—1349.
61. Лехт Е.Е., Рудницкий Г.М., Франкелен О. и др. Исследования статистических свойств мазерных источников ОН // Письма в "Астрон. журн." 1975. Т. 1. С. 29—32.
62. Кардашев Н.С. Последние исследования CETI в СССР: Препр. ИКИ АН СССР. N 279. М., 1976. 23 с.
63. Маковецкий П.В. О структуре позывных внеземных цивилизаций // Астрон. журн. 1976. Т. 53. С. 222—224.

64. *Маковецкий П.В.* Позывные внеземных цивилизаций типа πF_{π} и эффект Доплера // Межвузовский сборник / Ленингр. электротехн. ин-т. Л., 1977. N 118. С. 150—155.
65. *Маковецкий П.В.* Новая Лебеда — синхросигнал для внеземных цивилизаций? // Астрон. журн. 1977. Т. 54. С. 449—451.
66. *Маковецкий П.В.* Эффективность привязки позывных внеземных цивилизаций к естественным явлениям // Изв. вузов. Радиофизика. 1978. Т. 21. С. 139—141.
67. *Троицкий В.С.* Программа поиска внеземных цивилизаций // Проблема поиска жизни во Вселенной. М.: Наука, 1986. С. 227—230.
68. *Буйакс В.И., Гвамичава А.С., Горшков Л.А.* и др. Неограниченно наращиваемый космический радиотелескоп // Космич. исслед. 1978. Т. 16. С. 767—776. — См. также. Англ. пер.: *Buyaks V.I., Gvamichava A.S., Gorshkov L.A.* et al. An infinitely expandable space radiotelescope // Acta astronaut. 1979. Vol. 6. P. 175—201.
69. *Шварцман В.Ф.* Эксперимент МАНИЯ. Астрофизические задачи, математические методы, инженерный комплекс, результаты первых наблюдений // Сообщ. САО АН СССР. 1977. N 19. С. 5—38.
70. *Царевский Г.С., Шварцман В.Ф.* Схема и методика эксперимента МАНИЯ // Там же. С. 39—51.
71. *Мансуров В.Н., Шварцман В.Ф.* Программно-алгоритмический комплекс эксперимента МАНИЯ: (Первый этап) // Там же. С. 52—74.
72. *Демчук М.И., Евсеев О.А., Царевский Г.С.* и др. Аппаратурный комплекс эксперимента МАНИЯ // Сообщ. САО АН СССР. 1977. N 20. С. 5—17.
73. *Бескин Г.М., Евсеев О.А., Мансуров В.Н.* и др. Поиск сверхбыстрой оптической переменности у рентгеновских источников и звезд типа Т Тау по программе эксперимента МАНИЯ в 1973—1974 гг. // Там же. С. 18—21.
74. *Евсеев О.А., Мансуров В.Н., Нестеренко Н.М.* и др. Поиск сверхбыстрой переменности у объектов с непрерывным оптическим спектром по программе эксперимента МАНИЯ в 1973 г. // Там же. С. 30—38.
75. *Шварцман В.Ф.* Эксперимент МАНИЯ и возможности поиска внеземных цивилизаций в оптическом диапазоне: Докл. на Всесоюз. школе-семинаре СЕТИ, Зеленчукская, окт. 1975 // Проблема поиска внеземных цивилизаций. М.: Наука, 1981. С. 122—125.
76. *Zakirov U.N.* On the energetic optimal trajectories of a probe to search extraterrestrial civilizations // Proc. 24th IAF Int. Astronautical Congress, Baku, USSR, October 7—13, 1973. 37 p.
77. *Zakirov U.N.* On equations, dynamics and kinematical relations describing maneuver of an interstellar relativistic probe // Proc. 25th Intern. Astronaut. Congr., Amsterdam, Sept. 30—Oct. 5, 1974. Amsterdam, 1974. 14 p. (IAF Pap.; N A74-15).
78. *Zakirov U.N.* Some energetics estimations of a relativistic spacecraft ensemble // 26th Intern. Astronaut. Congr., Lisbon, Portugal, Sept. 21—27, 1975. Lisbon, 1975. 14 p. (IAF Pap.; N A75-029).
79. *Астрономия. Методология. Мирозрение.* М.: Наука, 1979. 397 с.
80. *Пановкин Б.Н.* Объективность знания и проблема обмена смысловой информацией с внеземными цивилизациями // Философские проблемы астрономии XX в. М.: Наука, 1976. С. 240—265.
81. *Крейн И.М.* Язык человеческого общества как частный случай языка "разумных" систем // 7-й Всесоюз. симпоз. по логике и методологии науки. Киев, 1976. С. 168—170.
82. *Крейн И.М.* Опыт построения модели развития систем одного типа до уровня "разумности": Препр. Ин-та кибернетики АН УССР N 77-64. Киев, 1977. 47 с.
83. *Krein I.M.* The problem of contact of intelligent systems // 29th IAF Congress. Dubrovnik. 1978. 19 p. (IAF Pap.; N 78-A-44).
84. *Krein I.M.* On the problem of the definition of intelligence // 28th IAF Congress. Praha, Sept. 25—Oct. 1, 1977. 14 p. (IAF Pap.; N 77-A-50).
85. *Некоторые вопросы проблемы контакта человека с высокоорганизованными системами:* Препр. Ин-та кибернетики АН УССР N 78—69. Киев, 1978.
86. *Некоторые аспекты проблемы понимания:* Препр. Ин-та кибернетики АН УССР N 78-73. Киев, 1978. 56 с.
87. *Крейн И.М.* Принципиальные моменты контакта человека с внеземными цивилизациями // Проблема поиска внеземных цивилизаций. М.: Наука, 1981. С. 172—185.

88. Пановкин Б.Н. Школа-семинар по проблеме СЕТИ // Земля и Вселенная. 1976. N 4. С. 68—71.
89. Проблема поиска внеземных цивилизаций. М.: Наука, 1981. 264 с.
90. Шкловский И.С. О возможной уникальности разумной жизни во Вселенной // Вопр. философии. 1976. N 9. С. 80—93.
91. Кардашев Н.С. О стратегии поиска внеземных цивилизаций // Там же. 1977. N 12. С. 43—54.
92. Маковецкий П.В., Петрович Н.Т., Троицкий В.С. Проблема внеземных цивилизаций — проблема поиска // Там же. 1979. N 4. С. 47—59.
93. Лем С. Одиноки ли мы в Космосе? // Знание — сила. 1977. N 7. С. 40—41.
- 93а. Шкловский И.С. Отвечаю Лему // Там же. С. 41—42.
94. Гиндилис Л.М. К методике оценки числа цивилизаций в Галактике: Докл. на Всесоюз. школе-семинаре СЕТИ, Зеленчукская, окт. 1975 // Проблема поиска внеземных цивилизаций. М.: Наука, 1981. С. 126—148.
95. Гиндилис Л.М., Пановкин Б.Н. Методология оценки числа внеземных цивилизаций // Астрономия. Методология. Мирозозрение. М.: Наука, 1979. С. 336—358.
96. Троицкий В.С. Развитие внеземных цивилизаций и физические закономерности // Проблема поиска внеземных цивилизаций. М.: Наука, 1981. С. 5—29.
97. Троицкий В.С. К вопросу о населенности Галактики // Астрон. журн. 1981. Т. 58. С. 1121—1130.
98. Рубцов В.В., Урсул А.Д. Проблема внеземных цивилизаций: Филос.-метод. аспекты. Кишинев: Штиинца, 1984. 263 с.
99. Гиндилис Л.М. Поиск разумной жизни во Вселенной // Земля и Вселенная. 1982. N 3. С. 48—53; N 4. С. 52—57.
100. Петрович Н.Т. Межзвездная связь с помощью относительных методов передачи сигналов // Проблема поиска жизни во Вселенной. М.: Наука, 1986. С. 152—161.
101. Проблема поиска жизни во Вселенной: Тр. Таллин. симпоз. М.: Наука, 1986. 256 с.
102. Поиск разумной жизни во Вселенной: Тез. докл. Всесоюз. симпоз. Таллин, 1981. 46 с.
103. Sagan C. Extraterrestrial intelligence: An international petition // Science. 1982. Vol. 218. P. 426.
104. The International SETI petition // Planet. Rep. 1973. Vol. 3. P. 11.
105. Papagiannis M.D. Commission 51: Search for extraterrestrial life // Trans. IAU. 1983. Vol. 18-B. P. 323—329.
106. Papagiannis M.D. Search for extraterrestrial life — a new commission of the International Astronomical Union // J. Brit. Interplanet. Soc. 1983. Vol. 36. P. 305—307.
107. Papagiannis M.D. Commission 51: Search for extraterrestrial life // Trans. IAU. Vol. 19A. Reports on astronomy / Ed. R.N. West. Dordrecht: Reidel, 1985. P. 713—723.
108. Papagiannis M.D. The search for extraterrestrial life: Recent developments // J. Brit. Interplanet. Soc. 1985. Vol. 38. P. 281—285.
109. The search for extraterrestrial life: Recent developments: Proc. of the 112th Symp. of the IAU, Boston, US, June 18—21, 1984 / Ed. M.D. Papagiannis. Dordrecht etc.: Reidel, 1985. 579 p.
110. Kardashev N.S. On the inevitability and the possible structures of supercivilizations // The search for extraterrestrial life: Recent developments: Proc. of the 112th Symp. of the IAU, Boston, US, June 18—21, 1984 / Ed. M.D. Papagiannis. Dordrecht etc., 1985. P. 497—504.
111. Slysh V.I. A search in the infrared to microwave for astroengineering activity // Ibid. P. 315—319.
112. Сурдин В.Г. Шаровые скопления как объекты SETI // Астрон. циркуляр. 1985. N 1357. С. 3—6.
113. Захожай В.А., Рузмайкина Т.В. Звезды для поиска планетных систем // Астрон. вестн. 1986. N 2. С. 128—133.
114. Troitskii V.S. Development regularities of extraterrestrial intelligence and the search strategy // IAA Pap. 1983. N 271.
115. Троицкий В.С. Научные основания проблемы существования и поиска внеземных цивилизаций // Проблема поиска жизни во Вселенной. М.: Наука, 1986. С. 3—20.
116. Архипов А.В. О вероятных местах расположения внеземных цивилизаций: Препр. ИРФЭ АН УССР N 303. Харьков, 1986. 14 с.
117. Сучкин Г.Л., Токарев Ю.В., Лукьянов Л.Г. и др. Лагранжевы точки в проблеме поиска внеземных цивилизаций // Проблема поиска жизни во Вселенной. М.: Наука, 1986. С. 138—144.

118. Маров М.Я., Закиров У.Н. О проекте полета космического зонда к планетной системе звезды // Там же. С. 215—220.
119. Закиров У.Н. Механика релятивистских космических полетов. М.: Наука, 1984. 152 с.
120. Сурдин В.Г. Запуск галактического зонда с использованием кратного пертурбационного маневра // Астрон. вестн. 1985. Т. 19. С. 354—358.
121. Крейн И.М. Проблема контакта человека с "разумными" высокоорганизованными системами: Препр. Ин-та кибернетики АН УССР N 86-46. Киев, 1986. 27 с.
122. Крейн И.М. Контакт "разумных" систем // Проблема поиска жизни во Вселенной. М.: Наука, 1986. С. 104—110.
123. Чукреева О.А. Об одном уровне построения языков-посредников // Там же. С. 110—115.
124. Лесков Л.В. О системном подходе к проблеме космических цивилизаций // Там же. С. 123—129.
125. Лесков Л.В. Космические цивилизации — проблемы эволюции. М.: Знание, 1985. 55 с.
126. Nussinov M.D., Lysenko S.V. Space vacuum hinders radiopanspermia // J. Brit. Interplanet. Soc. 1983. Vol. 36. P. 195—200.
127. Nussinov V.D., Lysenko S.V. Space vacuum prevents radiopanspermia // Orig. Life. 1983. Vol. 13. P. 153—164.
128. Марочник Л.С., Мухин Л.М. Галактический пояс жизни: Препр. ИКИ АН СССР N 761. М., 1983. То же // Проблема поиска жизни во Вселенной. М.: Наука, 1986. С. 41—46.
129. Слыш В.И. Прецизионный радиотелескоп РТ-70 // XVIII Всесоюз. радиоастрон. конф.: Радиотелескопы и радиоинтерферометры: Тез. докл. Иркутск, 1986. Ч. 2. С. 222—223.
130. Царевский Г.С. Космическая радиоастрономия как инструмент СЕТИ // Проблема поиска жизни во Вселенной. М.: Наука, 1986. С. 183—187.
131. Маров М.Я., Закиров У.Н. О проекте полета космического зонда к планетной системе звезды // Там же. С. 215—220.
132. Закиров У.Н. Механика релятивистских космических полетов. М.: Наука, 1984. 152 с.
133. Сурдин В.Г. Запуск галактического зонда с использованием кратного пертурбационного маневра // Астрон. вестн. 1985. Т. 19. С. 354—358.
134. Крейн И.М. Проблема контакта человека с "разумными" высокоорганизованными системами: Препр. Ин-та кибернетики АН УССР N 86-46. Киев, 1986. 27 с.
135. Крейн И.М. Контакт "разумных" систем // Проблема поиска жизни во Вселенной. М.: Наука, 1986. С. 104—110.
136. Чукреева О.А. Об одном уровне построения языков-посредников // Там же. С. 110—115.
137. Лесков Л.В. О системном подходе к проблеме космических цивилизаций // Там же. С. 123—129.
138. Лесков Л.В. Космические цивилизации — проблемы эволюции. М.: Знание, 1985. 55 с.
139. Nussinov M.D., Lysenko S.V. Space vacuum hinders radiopanspermia // J. Brit. Interplanet. Soc. 1983. Vol. 36. P. 195—200.
140. Nussinov V.D., Lysenko S.V. Space vacuum prevents radiopanspermia // Orig. Life. 1983. Vol. 13. P. 153—164.
141. Марочник Л.С., Мухин Л.М. Галактический пояс жизни: Препр. ИКИ АН СССР N 761. М., 1983. То же // Проблема поиска жизни во Вселенной. М.: Наука, 1986. С. 41—46.
142. Слыш В.И. Прецизионный радиотелескоп РТ-70 // XVIII Всесоюз. радиоастрон. конф.: Радиотелескопы и радиоинтерферометры: Тез. докл. Иркутск, 1986. Ч. 2. С. 222—223.
143. Царевский Г.С. Космическая радиоастрономия как инструмент СЕТИ // Проблема поиска жизни во Вселенной. М.: Наука, 1986. С. 183—187.
144. Цейтлин Н.М. Применение методов радиоастрономии в антенной технике. М.: Сов. радио, 1966. 213 с.
145. Цейтлин Н.М. Антенная техника и радиоастрономия. М.: Сов. радио, 1976. 352 с.
146. Николаев А.Г., Перцов С.В. Радиотеплокация: (Пассивная радиолокация). М.: Сов. радио, 1964. 322 с.
147. Башаринов А.Е., Тучков Л.Т., Поляков В.М., Ананов Н.И. Измерение радиотепловых и плазменных излучений. М.: Сов. радио, 1968. 390 с.
148. Башаринов А.Е., Гурвич А.С., Егоров С.Т. Радионизлучение Земли как планеты. М.: Наука, 1974. 188 с.
149. Алексеев В.А. Радиоастрономия со сверхдлинными базами для решения задач астрометрии, гео- и планетодинамики, геодезии, службы времени // Изв. вузов. Радиофизика. 1983. Т. 26. С. 1371—1379.
150. Кисляков А.Г., Станкевич К.С. Исследование тропосферного поглощения радиоволн радиоастрономическими методами // Там же. 1967. Т. 10. С. 1244—1262.
151. Кобрин М.М., Коришнов А.И., Снегирев С.Д., Тимофеев Б.В. О резком возрастании квазипериодических компонентов флуктуаций наклона спектра радионизлучения Солнца на волне $\lambda = 3$ см в период, предшествующий активным событиям августа 1972 г. // Солнечные данные. 1973. N 10. С. 79—85.
152. 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 радионизлучении Солнца перед протонными вспышками // Геомагнетизм и аэрономия. 1979. Т. 19. С. 306—310.
153. Жевакин С.А., Троицкий В.С., Цейтлин Н.М. Радионизлучение атмосферы и исследование поглощения сантиметровых радиоволн // Изв. вузов. Радиофизика. 1958. Т. 1. С. 19—26.
154. Саломонович А.Е., Атаев О.М. Тепловое излучение и поглощение в земной атмосфере радиоволн 8-мм диапазона // Там же. 1960. Т. 3. С. 606—613.
155. Кисляков А.Г., Никонов В.Н., Стреженева К.М. Экспериментальные зависимости атмосферного поглощения на волне 4,1 мм от высоты над уровнем моря // Изв. АН СССР. Физика ат-

ГЛАВА 8

1. Очерки истории радиоастрономии в СССР. Киев: Наук. думка, 1985. 280 с.
2. Рытов С.М. Введение в статистическую радиофизику. М.: Наука, 1966. 404 с.
3. Кузьмин А.Д., Саломонович А.Е. Радиоастрономические методы измерений

- мосферы и океана. 1968. Т. 4. С. 321—324.
16. Кисляков А.Г., Куликов Ю.Ю., Рыскин В.Г. Спектральные исследования космического и атмосферного излучения // Сб. науч. тр. ИПФ АН СССР. Горький, 1979. С. 84—123.
 17. Кисляков А.Г. Исследование космического теплового излучения на миллиметровых радиоволнах: Дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Горький, 1976.
 18. Соломонович А.Е., Соломонов С.В., Хайкин А.С. и др. Измерения субмиллиметрового излучения атмосферы Земли с ИСЗ // ДАН СССР. 1975. Т. 233. С. 852—855.
 19. Соломонович А.Е., Соломонов С.В., Домбковская Е.П. и др. Исследование субмиллиметрового излучения конвективных облачных систем тропической области с ИСЗ "Космос-669" // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1977. Т. 13. С. 391—397.
 20. Кисляков А.Г., Сухонин Е.В. Аппаратурный комплекс и результаты исследований распространения миллиметровых волн на наклонных трассах // Тр. Всесоюз. школы-семинара по распространению миллиметровых и субмиллиметровых волн в атмосфере. М.: ИРЭ АН СССР. 1983. С. 236—241.
 21. Соколов А.В., Сухонин Е.В. Ослабление миллиметровых волн в толще земной атмосферы // Итоги науки и техники. Радиотехника. М.: ВИНТИ, 1980. Т. 20. С. 107—202.
 22. Кутуза Б.Г., Митник Л.М., Шутко А.М. Контрасты радиоярких температур облаков и дождей в СВЧ-диапазоне // Спутниковая метеорология: Труды. Л.: Гидрометеониздат, 1969. Вып. 50. С. 86—93.
 23. Башаринов А.Е., Горелик А.Г., Калашников В.В. и др. Совместные радиотепловые и радиолокационные измерения метеопараметров облаков и дождя // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1970. Т. 6. С. 526—530.
 24. Обухов А.М., Башаринов А.Е., Васильев Ю.В. и др. Исследование атмосферы по собственному радиотепловому излучению на ИСЗ "Космос-243" // Космич. исслед. 1971. Т. 9. С. 66—73.
 25. Нелепо Б.А., Арманд Н.А., Хмыров Б.Е. и др. Эксперимент "Океан" на ИСЗ "Космос-1076" и "Космос-1151" // Исслед. Земли из космоса. 1982. N 3. С. 5—12.
 26. Арманд Н.А., Башаринов А.Е. Исследование Земли с летательных аппаратов. Результаты, полученные с помощью радиофизических методов // Вестн. АН СССР. 1977. N 8. С. 28—38.
 27. Стоцкий А.А. О влиянии атмосферной турбулентности на КПД линейной антенны // РЭ. 1969. Т. 14. С. 387—390.
 28. Дравских А.Ф., Стоцкий А.А., Финкельштейн А.М. и др. Тропосферные ограничения на точность радиоинтерферометрических координатных измерений при помощи частоты интерференции // Там же. 1977. Т. 22. С. 2305—2308.
 29. Кайдановский М.Н., Стоцкий А.А. Экспериментальные характеристики флуктуаций радиоизлучения облачной атмосферы на сантиметровых волнах // Изв. вузов. Радиофизика. 1979. Т. 22. С. 886—888.
 30. Кайдановский М.Н., Стоцкий А.А. Чистка радиоастрономических изображений протяженных объектов от атмосферных помех при многоволновом приеме // РЭ. 1980. Т. 25. С. 1005—1007.
 31. Кокурин Ю.Л., Сухановский А.П., Алексеев Ю.И. Исследования крупномасштабных неоднородностей ионосферы радиоастрономическим методом // Там же. 1961. Т. 6. С. 738—746.
 32. Беликович В.В., Бенедиктов Е.А. Радиоастрономический метод измерений величины поглощения радиоволн в ионосфере // Изв. вузов. Радиофизика. 1969. Т. 12. С. 1439—1454.
 33. Ерухимов Л.М., Денисов Н.Г. Статистические свойства фазовых флуктуаций при полном отражении волн от ионосферного слоя // Геомагнетизм и аэрономия. 1966. Т. 5. С. 695—701.
 34. Беликович В.В., Бенедиктов Е.А., Гетманцев Г.Г. и др. Новые результаты исследований нелинейных явлений в ионосфере // Изв. вузов. Радиофизика. 1975. Т. 18. С. 516—526.
 35. Разин В.А., Хрулев В.В., Федоров В.Т. и др. Наблюдения поляризации космического радиоизлучения вблизи антицентра Галактики на волнах 70, 60 и 40 см // Там же. 1968. Т. 11. С. 1461—1472.
 36. Разин В.А. Открытие частичной линейной поляризации распределенного космического радиоизлучения // Открытия в СССР. М.: ЦНИИПИ, 1968. С. 13—14.
 37. Троицкий В.С., Кузнецова М.Г., Рассадовский В.А. Дистанционное измерение метеопараметров облачной атмосферы

- сферы радиометрическим методом // Изв. вузов. Радиофизика, 1979. Т. 22. С. 938—945.
38. Молчанов А.П. Излучение Солнцем радиоволн сантиметрового диапазона: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Л., 1950.
 39. Вейсиг Г.С., Кушнир В.Ф., Молчанов А.П. Результаты наблюдений смещения ЭЦР Солнца на волне 3,2 см // Солнечные данные. 1957. N 1/2. С. 108—110.
 40. Захарьев Л.Н., Леманский А.Л., Турчин В.И. и др. Методы измерения характеристик антенн СВЧ / Под ред. Н.М. Цейтлина. М.: Радио и связь, 1985. 368 с.
 41. Бахрах Л.Д., Кременецкий С.Д., Курочкин А.П. и др. Методы измерений параметров излучающих систем в ближней зоне. Л.: Наука, 1985. 272 с.
 42. Бахрах Л.Д., Курочкин А.П. Голография в микроволновой технике. М.: Сов. радио, 1979. 320 с.
 43. Aarons J. The measurement of highly directive antenna patterns and overall sensitivity of receiving system by solar and cosmic noise // Proc. IRE. 1953. Vol. 41. P. 403—405.
 44. Векслер Н.В., Калинин А.В., Коротков В.С., Турчин В.И. Измерение поляризационных и фазовых диаграмм направленности антенн и амплитудно-фазового распределения корреляционным методом с использованием веземных источников радиоизлучения // Изв. вузов. Радиофизика. 1984. Т. 27, N 3. С. 341—350.
 45. Кайдановский Н.Л., Мирзабекян Э.Г., Хайкин С.Э. Поляризационный радиометр на 3,2 см // Тр. Пятого совещ. по вопр. космогонии, 9—12 марта 1955 г. М.: Изд-во АН СССР, 1956. С. 113—122.
 46. Троцкий В.С. Радиоастрономические методы исследований антенн // РЭ. 1956. Т. 1. С. 601.
 47. Плечков В.М., Разин В.А. Результаты измерений интенсивности радиоизлучения дискретных источников на 3,2 и 9,7 см // Тр. Пятого совещ. по вопр. космогонии, 9—12 марта 1955 г. М.: Изд-во АН СССР, 1956. С. 430—435.
 48. Троцкий В.С., Цейтлин Н.М. Радиоастрономические методы абсолютных измерений интенсивности сигнала, калибровки антенн и радиотелескопов на сантиметровых волнах // Изв. вузов. Радиофизика. 1961. Т. 4. С. 393—414.
 49. Кротиков В.Д., Порфирьев В.А., Троцкий В.С. Разработка метода прецизионного измерения интенсивности поля и эталонирования радиоизлучения Луны на 3,2 см // Там же. С. 1004—1012.
 50. Дмитренко Д.А., Цейтлин Н.М. Об абсолютном измерении интенсивности с помощью "черного" диска, расположенного в зоне Френеля // Там же. 1969. Т. 12. С. 639—643.
 51. Саломонович А.Е. Радиоизлучение Луны в 8-мм диапазоне волн // Астрон. журн. 1958. Т. 35. С. 129—136.
 52. Троцкий В.С., Цейтлин Н.М. Метод измерения коэффициента рассеяния и фоновых шумов антенн. Абсолютные измерения яркости фона на СВЧ // Изв. вузов. Радиофизика. 1960. Т. 3. С. 667—671.
 53. Цейтлин Н.М. Об измерении КНД и КПД антенн на метровых волнах по веземному радиоизлучению // Там же. 1958. Т. 1. С. 105—111.
 54. Дугин Н.А. Разработка и исследование двухэлементной системы апертурного синтеза: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Горький, 1983.
 55. Разин В.А., Федоров В.Т. Интенсивности ряда источников, Луны, Солнца на частоте 927 МГц // Изв. вузов. Радиофизика. 1963. Т. 6. С. 1052—1053.
 56. Троцкий В.С., Станкевич К.С., Цейтлин Н.М. и др. Эталонирование потоков Кассиопеи А и Лебедя А в диапазоне 300—9375 МГц // Астрон. журн. 1971. Т. 48. С. 1150—1153.
 57. Цейтлин Н.М., Дмитренко Д.А., Дмитренко Л.В. и др. Результаты абсолютных измерений интенсивности Кассиопеи А, Лебедя А, Тельца А и Девы А на волнах 30—100 см и их спектры в диапазоне 3—100 см // Изв. вузов. Радиофизика. 1976. Т. 19. С. 1106—1113.
 58. Иванов В.П., Станкевич К.С. Абсолютная радиоастрономическая шкала потоков: Препр. НИРФИ N 183. Горький, 1984. 52 с.
 59. Дмитренко Д.А., Цейтлин Н.М., Виноградова Л.В. и др. Абсолютные измерения интенсивности излучения Кассиопеи А, Лебедя А, Тельца А в диапазоне 3—15 см // Изв. вузов. Радиофизика. 1970. Т. 13. С. 823—829.
 60. Виняйкин Е.Н., Разин В.А. О вековом уменьшении плотностей потоков радиоизлучения Кассиопеи А и Тельца А на 917 МГц // Астрон. журн. 1979. Т. 56. С. 913—917.
 61. Станкевич К.С., Иванов В.П. Периодические колебания интенсивности радиоизлучения Кассиопеи А // Тез.

- докл. XV Всесоюз. конф. по галактической и внегалактической радиоастрономии. Харьков, 1983. С. 134.
62. Цейтлин Н.М., Дмитренко Л.В., Снегирева В.В. О переменности радиоизлучения Тельца А // Изв. вузов. Радиофизика. 1980. Т. 23. С. 996—997.
 63. Троцкий В.С., Кротилов В.Д. Радиоизлучение Луны // УФН. 1963. Т. 81. С. 589—639.
 64. Саломенович А.Е. Методы и некоторые результаты радиоастрономических исследований в миллиметровом диапазоне волн: Дис. ... д-ра физ.-мат. наук М., 1964. 355 с.
 65. Лихтерман Л.Б., Кисляков А.Г., Тимофеева Т.В. и др. Применение теплового радиоизлучения человека в нейрохирургической диагностике // I Всесоюз. биофиз. съезд: Тез. докл. М.: Медицина, 1982. Т. 4. С. 94.
 66. Троцкий В.С., Абрамов В.И., Белов И.Ф. и др. Результаты исследования собственного радиоизлучения человека в дм диапазоне волн // Изв. вузов. Радиофизика. 1981. Т. 24. С. 118—121.
 67. А.с. 995062 СССР. Способ создания и хранения временных интервалов / Н.Ф. Ильин, Ю.П. Илясов, Ю.Д. Иванова. Опубл. в Б.И., 1982. N 5. С. 256.
 68. Ильин В.Г., Илясов Ю.П., Кузьмин А.Д. и др. Шкала пульсарного времени // XIV Всесоюз. конф. по радиоастрономии: аппаратура, антенны, методы: Тез. докл. Ереван, 1982. С. 373—374.
 69. Матвеевко Л.И., Кардашев Н.С., Шоломицкий Г.Б. О радиоинтерферометре с большой базой // Изв. вузов. Радиофизика. 1965. Т. 8. С. 651—654.
 70. Алексеев В.А., Гатэлюк Э.Д., Липатов Б.Н. и др. Синхронизация шкал времени в пунктах РСДБ по наблюдениям мазерных источников космического радиоизлучения // Там же. 1975. Т. 18. С. 1777—1785.
 71. Алексеев В.А., Липатов Б.Н., Шеколов Б.В. Радиоастрометрия с применением дифференциальных интерферометрических измерений на сверхдлинных базах // Там же. 1976. Т. 19. С. 1669—1677.
 72. Дравских А.Ф., Красинский Г.А., Финкельштейн А.М. Радиоастрономическая инерциальная система координат, основанная на измерении дуг между радиоисточниками // Письма в "Астрон. журн." 1975. Т. 1. С. 43—48.
 73. Жонголович И.Д., Валяев В.И., Малков А.А. и др. Специальное комплексное использование трех радиоинтерферометров со сверхдлинными базами // Бюл. ИТА АН СССР. 1980. Т. 14. С. 529—551.
 74. Алексеев В.А., Алтунин В.И., Антипенко А.А. и др. Измерения координат АМС "Вега" с применением РСДБ // Тез. докл. XVIII Всесоюз. радиоастрон. конф. Иркутск: СИБИЗМИР СО АН СССР. 1986. С. 219—220.
 75. Алексеев В.А., Алтунин В.И., Антипенко А.А. и др. Исследование комы кометы Галлея методом длиннобазовой интерферометрии с использованием радиосигналов пролетных аппаратов "Вега" // Там же. С. 225—226.
 76. Матвеевко Л.И., Сагдеев Р.З., Балабанов В.М. и др. Сверхдальняя радиоинтерференционная сеть на волне 18 см // Письма в "Астрон. журн." 1986. Т. 12. С. 59—65.
 77. Алексеев В.А. О выборе космических радиоисточников для построения инерциальной системы координат средствами длиннобазовой радиоинтерферометрии // Астрономические исследования. Киев: Наук. думка, 1981. С. 71—75.
 78. Загати В.И., Мисежников Г.С., Пузанов В.А. и др. Радиометр для спектральных измерений в диапазоне 8 мм с квантовым парамагнитным усилителем // ПТЭ. 1968. N 5. С. 118—121.
 79. Гольнев В.Я., Корольков Д.В., Фридман П.А. Адаптивный радиометр с пилот-сигналом // Изв. САО АН СССР. 1981. N 13. С. 52—61.
 80. Венгер А.П., Гассанов Л.Г., Груздь Ю.Д. и др. Радиометрический приемник диапазона волн с малошумящим охлаждаемым транзисторным усилителем на входе // XVI Всесоюз. конф. по радиоастрономии: Тез. докл. Ереван, 1982. С. 109.
 81. Есепкина Н.А., Рыжков Н.Ф., Прусс-Жуковский С.В. и др. Акустический спектрометр для радиоастрономии: Препр. САО АН СССР N 11. Л., 1984. 36 с.
 81. Есепкина Н.А., Корольков Д.В., Парийский Ю.Н. Радиотелескопы и радиометры. М.: Наука, 1973. 416 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
Глава 1. ГАЛАКТИЧЕСКАЯ И ВНЕГАЛАКТИЧЕСКАЯ РАДИОАСТРОНО- МИЯ	11
Глава 2. РАЗВИТИЕ КОСМИЧЕСКОЙ РАДИОСПЕКТРОСКОПИИ В СССР ..	56
Глава 3. РАДИОАСТРОНОМИЯ И КОСМОЛОГИЯ	79
Глава 4. РАДИОИЗЛУЧЕНИЕ ЛУНЫ	88
Глава 5. РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛАНЕТ	111
Глава 6. РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛАНЕТ В СОВЕТ- СКОМ СОЮЗЕ	122
Глава 7. СОВЕТСКАЯ РАДИОАСТРОНОМИЯ И ПОИСКИ ВНЕЗЕМНЫХ ЦИВИЛИЗАЦИЙ	154
Глава 8. ПРИКЛАДНАЯ РАДИОАСТРОНОМИЯ	176
ЛИТЕРАТУРА	195

CONTENTS

PREFACE	3
Chapter 1. GALACTIC AND METACALACTIC RADIO ASTRONOMY	11
Chapter 2. THE DEVELOPMENT OF COSMIC RADIO SPECTROSCOPY IN THE USSR	56
Chapter 3. RADIO ASTRONOMY AND COSMOLOGY	79
Chapter 4. THE MOON'S RADIO EMISSION	88
Chapter 5. RADIO ASTRONOMICAL INVESTIGATIONS OF PLANETS	111
Chapter 6. RADAR INVESTIGATIONS OF PLANETS IN THE SOVIET UNION.	122
Chapter 7. SOVIET RADIO ASTRONOMY AND THE SEARCH FOR EXTRA- TERRESTRIAL INTELLIGENCE	154
Chapter 8. APPLIED RADIO ASTRONOMY	176
REFERENCES	195

Научное издание

Гиндилис Лев Миронович,
Дагкесаманский Рустам Давудович,
Кузьмин Аркадий Дмитриевич и др.

РАЗВИТИЕ РАДИОАСТРОНОМИИ В СССР

*Утверждено к печати
Институтом радиотехники
и электроники Академии наук СССР*

Редактор *Т.С. Смирнова*
Художник *А.Г. Кобрин*
Художественный редактор *М.Л. Храмцов*
Технический редактор *О.В. Аредова*
Корректор *Л.М. Сахарова*

Набор выполнен в издательстве
на электронной фотонаборной системе

ИБ N 37308

Подписано к печати 24.10.88. Т — 20703
Формат 60×90¹/₁₆. Бумага офсетная N 1
Гарнитура Таймс. Печать офсетная
Усл.печ.л. 14,0+0,1 вкл. Усл.кр.-отт. 14,5
Уч.-изд.л. 17,6. Тираж 1000 экз. Тип. зак. 804
Цена 3 р. 70 к.

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

Современные проблемы физики и эволюции звезд. 15 л. 3 р.

Сборник содержит новейшие результаты исследований советских астрофизиков, касающиеся различных аспектов теории звездной эволюции. Подробные рассмотрены последние достижения советских астрономов в изучении звездообразования и физики молодых звезд и в исследовании моделей взрывов сверхновых звезд различных типов.

Книга предназначена для астрономов, физиков и теоретически подготовленных любителей астрономии.

Советские радиотелескопы и их применение в радиоастрономии Солнца/ В.В. Гельфрейх, В.В. Зайцев, Илясов и др.; Под ред. А.Е. Соломоновича. 20 л. 3 р. 90 к.

В книге описаны созданные в СССР уникальные радиотелескопы различного типа и назначения, в том числе приобретающие все большее значение системы из нескольких радиотелескопов — радиоинтерферометры. Изложены результаты исследований Солнца радиоастрономическими методами: открытие радиальных магнитных полей, сверхкороны, квазипериодических колебаний потока радиоизлучения.

Книга предназначена для специалистов в области астрофизики, радиоастрономии, радиофизики и радиотехники.

Заказы просим направлять по одному из перечисленных адресов магазинов "Книга—почтой"

252030 Киев, ул. Пирогова, 4

197345 Ленинград, Петрозаводская, 7

117192 Москва, Мичуринский пр-т, 12

3 р. 70 к.