

**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР
ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ РАДИОФИЗИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ (НИРФИ)**

Препринт № 163

**РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКИЕ
ИССЛЕДОВАНИЯ В г. ГОРЬКОМ**

**А. Г. Кисляков
В. А. Разин
В. С. Троицкий
Н. М. Цейтлин**

ГОРЬКИЙ 1983

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР
ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ РАДИОФИЗИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ (НИРФИ)

Препринт № 163

РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКИЕ
ИССЛЕДОВАНИЯ В г. ГОРЬКОМ

А. Г. Кисляков
В. А. Разин
В. С. Троицкий
Н. М. Цейтлин

ГОРЬКИЙ 1983

Делается краткий обзор развития радиоастрономических исследований в г. Горьком, начатых в 1946 г. в Горьковском физико-техническом институте и продолженных затем в Научно-исследовательском радиофизическом институте Минвуза РСФСР и в Институте прикладной физики АН СССР. Основное внимание уделяется истории создания и совершенствования материальной базы для экспериментальных исследований в области радиоастрономии, разработкам методов таких исследований и их результатам. Наиболее подробно освещен начальный период становления радиоастрономии в г. Горьком, отражена роль ученых, сделавших основополагающий вклад в этот период. Кратко изложены основные результаты разработок радиометров и радиотелескопов, методов их калибровки с учётом потерь в тракте и атмосферного поглощения. Дана характеристика полученных результатов астрофизических исследований дискретных источников радиоизлучения и распределенного фона, Солнца, Луны и планет, темных галактических туманностей и др. Описаны и первые попытки практических применений радиотелескопов, положившие начало возникновению прикладной радиоастрономии.

1. ПЕРВЫЙ ЭТАП (1946—1956 гг.)

Развитие исследований по радиоастрономии в г. Горьком началось в Горьковском государственном университете (ГГУ) и его Физико-техническом институте (ГИФТИ) с 1946 г. по инициативе и под руководством профессоров Г. С. Горелика и М. Т. Греховой. Работа проводилась на кафедре физики, которой заведовал Г. С. Горелик, и в руководимом им отделе ГИФТИ. М. Т. Грехова привлекла к этой работе кафедру электродинамики сверхвысоких частот и связанный с этой кафедрой научный отдел ГИФТИ.

Большое влияние на успешное развитие радиоастрономических исследований оказала организация по инициативе А. А. Андроновой, М. Т. Греховой, и Г. С. Горелика в 1945 г. в ГГУ первого в стране радиофизического факультета, деканом которого долгое время была М. Т. Грехова. Практически сразу же после организации нового факультета его студенты стали принимать участие в радиоастрономических исследованиях.

В середине 1946 г. Г. С. Горелик поручил И. Л. Берштейну разработку радиометра по типу радиометра Дикке. Была выбрана волна 10 см, так как она была в то время наиболее обеспечена СВЧ элементами и измерительной техникой.

В середине 1948 г. был создан радиометр на волну 10 см с пороговой чувствительностью около 3°K и проведены первые в Советском Союзе измерения радиоизлучения Солнца на этой волне.

В дальнейшем, однако, этот радиометр для систематических наблюдений не использовался, т. к. была разработана более совершенная аппаратура, приспособленная к тому же для работы в полевых условиях.

В марте 1947 г. В. С. Троицкому, в то время аспиранту ГГУ, его руководитель, профессор Г. С. Горелик предложил в качестве темы диссертации исследования в области радиоастрономии. Было предложено начать с разработки радиометра в метровом диапазоне волн, считавшемся тогда наиболее перспективным для радиоастрономических наблюдений.

ний. Для этой цели сразу же был выбран метод модуляции сигнала, который осуществлялся переключением входа приемника с антенны на эквивалент с помощью поляризованного реле с частотой около 25 Гц. После детектирования сигнал выделялся узкополосным камертонным фильтром. Радиометр был собран на волну 4 метра с использованием приемника и антенны учебной радиолокационной станции обнаружения. К этому времени еще не были разработаны где-либо радиометры модуляционного типа метрового диапазона. В марте 1948 г. этот радиометр впервые зарегистрировал радиоизлучение Солнца. Вращающаяся по азимуту антенна типа «волновой канал» находилась на крыше здания радиофизического факультета в самом центре города, а радиометр — в лаборатории. Поскольку антенна поворачивалась только по азимуту, прием проводился либо на восходе, либо на заходе Солнца.

Несмотря на малую чувствительность радиотелескопа и несовершенство радиометра, был сделан важный первый шаг, позволивший почувствовать физику и технику радиометрии, решить соответствующие радиофизические задачи теории и практики метода приема слабых шумовых сигналов вообще и в метровом диапазоне волн в особенности. Здесь не было предшествующих аналогов технического решения, как это имело место для сантиметровых волн в виде радиометра Дикке.

Вслед за этим с середины 1948 г. стал разрабатываться более совершенный, пригодный для работы в полевых условиях радиотелескоп на волну 1,5 метра. Эта волна была выбрана потому, что имелись два полотна синфазных антенн на поворотном устройстве от старой радиолокационной станции. По предложению Г. С. Горелика и М. Т. Греховой на одном из предприятий г. Горького под руководством зав. каф. радиотехники А. П. Скибарко были изготовлены и помещены на то же поворотное устройство новые два полотна синфазных антенн существенно больших размеров. Параллельно с изготовлением антенны шла разработка лабораторной схемы радиометра. Проверялись новые идеи модуляции сигнала, собирались специфические для радиометра схемы. Существенное участие в этом принял студент радиофака В. А. Зверев, теперь член-корр. АН СССР, который предложил ряд способов модуляции сигнала и усовершенствования схемы радиометра.

Когда основные принципы работы нового радиометра были проверены лабораторно, для инженерного исполнения были привлечены инженеры В. Л. Рахлин, А. А. Варыпаев и механик Е. А. Любимов. Так в г. Горьком образовалась первая ячейка экспериментальной радиоастрономии.

Радиотелескоп на волну 1,5 метра отличался рядом существенных новшеств. В радиотелескопе применялись два вида модуляции; переключением входа приемника с антенны на ее шумовой эквивалент и качанием луча диаграммы направленности антенны. Как уже говорилось, антенна состояла из двух синфазных полотен, расположенных на общем поворотном устройстве (рис. 1). В качестве эквивалента применялся нагруженный сопротивлением регулируемый отрезок замкнутого коаксиального волновода в виде тромбона, взятого от радиолокационной аппаратуры. «Тромбон» позволял менять длину замкнутого коаксиала от четверти до полуволны, меняя тем самым импеданс входа усилителя, а следовательно, и уровень шумов эквивалента. Установление их равенства со средними шумами антенны, которые определяются распределенным радиоизлучением неба и поверхности земли, позволяло исключить мешающий фоновый сигнал. Таким образом, осуществлялся квазиулевой метод приема.

Качание луча осуществлялось изменением разности фаз питания полотен антенн. Это достигалось путем поочередного подключения входа приемника к двум специально подобранным точкам фидера, соединяющего оба полотна антенны, с помощью релейного контактного или емкостного переключателя, управляемого синхронным мотором. Угол качания был выбран равным половине ширины диаграммы антенны. Низкочастотная часть радиометра имела гетеродинный фильтр, аналогичный использованному в радиометре Дикке.

Метод качания луча оказался весьма эффективным, позволяя надежно работать в плохой помеховой обстановке непосредственно в г. Горьком, где весной 1949 г. с этим радиотелескопом проводились пробные наблюдения радиоизлучения Солнца. Затем радиотелескоп был установлен в Зименках на высоком берегу Волги в 30 км. от г. Горького. Там с августа 1949 г. начались регулярные наблюдения радиоизлучения Солнца на волне 1,5 м. Путем наблюдения радиовосходов и радиозаходов Солнца проводились измерения радиорефракции метровых волн в атмосфере Земли.

В исследованиях на этом первом Горьковском радиотелескопе принимали участие сотрудники, аспиранты и студенты университета С. А. Жевакин, Г. Г. Гетманцев, А. Н. Малахов, А. В. Золотов, В. М. Плечков, З. И. Каменева и др. С этого времени Зименки стали загородной радиоастрономической лабораторией. В 1949 г. для лаборатории был выделен земельный участок площадью 2 гектара, в 1952 г. построены два сборных дома, а в 1960—1962 гг. построены и введены в эксплуатацию лабораторное здание, жилой дом и общежитие, затем гелиевая криогенная станция и, наконец, в 1962 г. завершено создание двух радиотелескопов РТ-15 с параболичес-

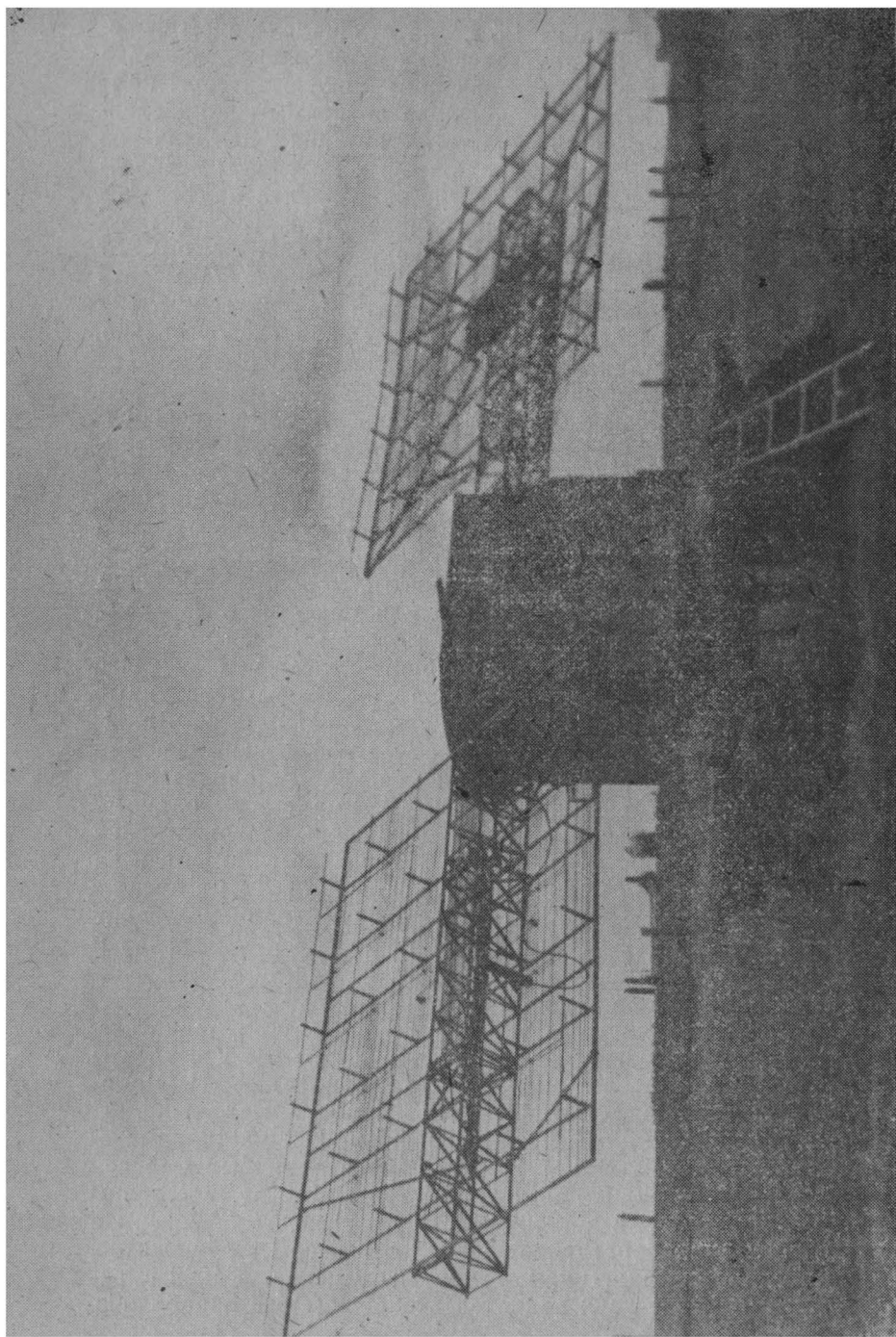


Рис. 1

скими рефлекторами диаметром 15 м. Сейчас лаборатория «Зименки» — самостоятельное научное подразделение института, где ведутся работы по радиоастрономии и физике ионосферы.

Радиотелескоп на метровые волны использовался вплоть до 1956 г. До 1952 г. на нем проводились исследования радиорефракции. Позднее В. А. Разиным на этом инструменте был начат поиск поляризации космического радиоизлучения. Используя имеющийся радиометр и создавая новые специальные оригинальные радиометры, лучше отвечающие требованиям обнаружения поляризации, В. А. Разин в 1956 г. надежно доказал существование линейной поляризации фонового космического радиоизлучения. На этом же радиотелескопе Г. Г. Гетманцевым проводились измерения радиоизлучения наиболее мощных дискретных источников с целью точного определения их интенсивности. Для этого им была разработана тепловая калибровка радиометра вместо применявшейся до этого калибровки по шумовому диоду.

Успешный опыт работы радиометра с качанием луча стимулировал использование этого способа для быстрого создания радиотелескопа на базе имевшейся радиолокационной станции на волну 10 см, где существовало устройство качания луча, достигаемое механическим вращением облучателя (диполя) около главного фокуса параболоида. По существу, это был уже почти готовый радиотелескоп, в котором обеспечивалась, если не самая главная, то важная функция радиометра — модуляция сигнала. Требовалось только присоединение гетеродинного фильтра. В 1949 г. была начата и в марте 1950 г. завершена разработка соответствующей аппаратуры, которую осуществил В. Л. Рахлин.

На этом радиотелескопе весной и летом 1950 г. проводились систематические измерения радиоизлучения Солнца от восхода до захода для определения рефракции и поглощения радиоволн в атмосфере Земли и их сезонных изменений.

С помощью этого радиотелескопа удалось впервые на столь длинной волне (10 см) фиксировать радиоизлучение земной атмосферы.

Радиотелескоп с круговым вращением луча позволял очень точно определять направление на Солнце. Это был прототип радиосекстанта, который впоследствии благодаря этим и последующим теоретическим и экспериментальным работкам с участием М. М. Кобрина, И. Ф. Белова, В. Л. Рахлина, Б. Н. Иванова и др. нашел широкое применение в практике.

В конце 1948 г. — начале 1949 г. по инициативе М. Т. Греховой была начата разработка радиометра на волну 3 см, которая велась на кафедре электродинамики СВЧ группой

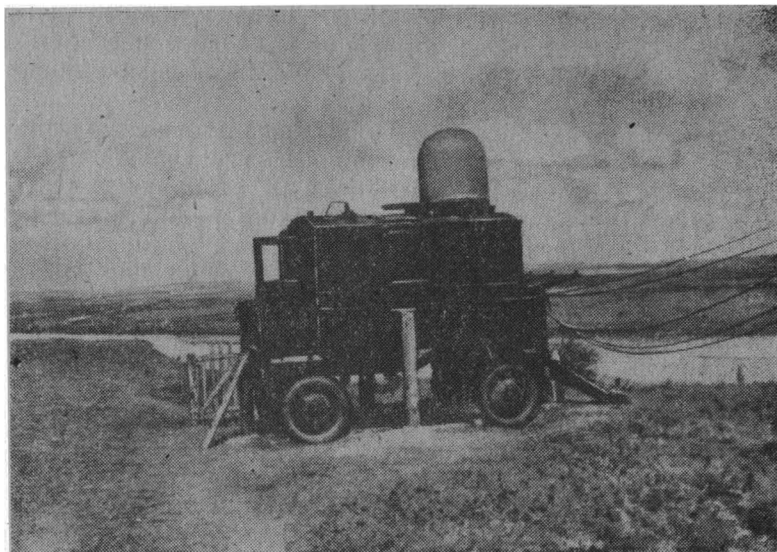


Рис. 2

С. И. Аверкова. Для этого использовалась приемная часть самолетной радиолокационной станции. Для модуляции была применена схема Дикке с вращающимся поглощающим диском.

В апреле 1950 г. радиотелескоп на волну 3 см с зеркалом диаметром 0,6 м под защитным колпаком начал работать в лаборатории «Зименки» (рис. 2). Его чувствительность была около 5°K . На этом радиотелескопе до июня 1950 г. проводились измерения радиоизлучения Солнца и атмосферы Земли.

Разработка радиотелескопов и методов измерения слабых сигналов сплошного спектра сопровождалась соответствующими теоретическими исследованиями, которые проводились В. С. Троицким. Эти результаты и создание первого радиотелескопа метровых волн составили предмет кандидатской диссертации В. С. Троицкого — первой в стране диссертации по радиоастрономии, защищенной весной 1950 г. в Физическом институте АН СССР.

С первых же шагов развитие радиоастрономии в г. Горьком было тесно связано с решением актуальных практических задач, а именно, с изучением условий распространения радиоволн в атмосфере Земли. Радиоастрономия предоставляла уникальные возможности для изучения рефракции и поглощения радиоволн в атмосфере Земли. Рефракция и поглощение на первых порах изучались по ослаблению радиоизлучения Солнца, а затем и Луны, в зависимости от изменения

угла места Солнца и Луны в течение дня. Затем открылась возможность определения поглощения по собственному тепловому радиоизлучению атмосферы, которое надежно измерялось на сантиметровых и дециметровых волнах с использованием созданных радиотелескопов. Это потребовало разработки вопросов теории радиоизлучения атмосферы и методов определения поглощения. Работы в этом направлении велись В. С. Троицким, С. А. Жевакиным и др. Итоги работы по исследованию рефракции и поглощения СВЧ в атмосфере Земли представлены в ряде научных отчетов. Позднее широкие теоретические, методические и экспериментальные исследования поглощения радиоволн в атмосфере и ее собственного радиоизлучения проводили С. А. Жевакин, Н. М. Цейтлин, А. Г. Кисляков, В. А. Разин, К. С. Станкевич, Л. И. Федосеев, В. В. Хрулев, Д. А. Дмитренко и др. в диапазоне от субмиллиметровых до дециметровых волн.

Таким образом, в 1946—1950 гг. радиоастрономические исследования начали обеспечиваться кадрами и материальными ресурсами. Стал функционировать специальный радиоастрономический подигон «Зименки». Группа радиоастрономии в отделе Г. С. Горелика насчитывала уже около 15 человек. Радиофизические лаборатории в г. Горьком, наряду с ФИАНом, стали ведущими центрами радиоастрономических исследований в стране.

В эти же годы в Горьком начали развиваться исследования в области теоретической радиоастрономии под руководством В. Л. Гинзбурга, с которым работали Г. Г. Гетманцев, Н. Г. Денисов, а позднее В. А. Разин, В. В. Железняков и др., с 1960 г. в Горьком работал известный советский астрофизик С. А. Каплан.

1.1. Радиотелескопы

После указанных выше первых результатов радиоастрономических и прикладных исследований стало очевидным, что для дальнейшего развития радиоастрономии необходимо создание новых, более мощных радиотелескопов, особенно это относилось к сантиметровым и дециметровым волнам, где вначале использовались антенны менее метра в диаметре. Директором ГИФТИ М. Т. Греховой и зав. отделом Г. С. Гореликом были предприняты шаги по изготовлению на одном из Горьковских заводов параболических антенн диаметром 4 метра. Эти антенны были изготовлены к 1952 г. В радиоастрономической лаборатории, которая сформировалась в отделе Г. С. Горелика, начались разработки новых, более совершенных и чувствительных радиометров сантиметровых и дециметровых волн для работы на новых антеннах. Опыт ра-

боты на первых радиотелескопах на волне 3 и 10 см показал ряд существенных недостатков радиометров принципиального характера. Особенно это касалось радиометра 3 см, собранного по типу радиометра Дикке. Прежде всего, большой фоновый сигнал, равный разности температур антенны (обычно 50°K) и диска (300°K), затруднял измерения слабого сигнала из-за флуктуаций усиления. Кроме того, обычно возникал сильный ложный сигнал, благодаря интерференции шумов входа, отражаемых от антенны и диска, неидеально согласованных с волноводом. Имелись и более грубые технические недостатки, такие, как модуляция собственных шумов смесителя на входе и т. п. Для избавления от фонового сигнала и расширения возможностей радиометра было решено создать новый радиометр на волну 3 см с переключением входа приемника на два эквивалентных входа, один из которых соединен с облучателем антенны, а другой — с регулируемым источником шумов или вторым облучателем антенны, расположенным рядом с первым, чтобы применить оказавшееся весьма эффективным качание луча. Для этого необходим был быстродействующий переключатель. В то время имелись лишь искровые переключатели, непригодные из-за больших шумов, поэтому создавался механический быстродействующий волноводный тройник-переключатель, работающий с частотой 20—80 Гц. В переключателе с помощью поляризованного реле поочередно замыкались то одно, то другое плечо тройника. Замыкание осуществлялось закорачиванием зазора между штырями в просвете индуктивных диафрагм. Зазор закорачивался противофазно стерженьком,двигающимся с помощью реле внутри трубчатых штырей.

Разработка радиометра на 10 см была осуществлена также с переключением усилителя на два эквивалентных входа. Другим новшеством, существенно улучшавшим реальную чувствительность радиометра, было применение «улитки» — длинного волновода, свернутого в улитку, исключавшего интерференцию входных шумов приемника. При волноводе, длина которого такова, что время пробега шумов к антенне и обратно больше времени корреляции шума в полосе приема, интерференция отсутствует. Использовался и другой способ подавления интерференционного сигнала, состоящий в том, что частота гетеродина модулировалась в небольших пределах, определяемых длиной антенного тракта; при достаточно быстром периодическом изменении частоты с периодом, меньшим постоянной времени выхода, интерференционная картина усреднялась. Все это позволило исключить ложные сигналы и различные «паразитные» эффекты и приблизило получаемую чувствительность к ее теоретическому значению. Особенности интерференционных шумов исследовались диплом-

ником В. В. Хрулевым, а их теория и влияние на точность измерений были рассмотрены в одной из работ В. С. Троицкого.

Стремление разобраться во всех источниках ошибок измерений шумовых сигналов привело далее к изучению шумов гетеродинов, применяемых во всех радиометрических приемниках того времени. К этому имелись благоприятные условия, состоявшие в том, что вопросами шумов генераторов еще до войны занимался И. Л. Берштейн, который разработал теорию естественной ширины линии, а затем разработал метод ее измерения в генераторах радиодиапазона. В 1954 г. В. С. Троицким была создана установка и проведено измерение естественной ширины линии клистронного генератора на волне 3,2 см. Результаты этой работы позволили обоснованно выбирать промежуточную частоту приемника радиометра и оптимальную схему гетеродинирования.

Вместе с экспериментальными исследованиями шумов в автоколебательной системе велись теоретические работы и, в частности, в Горьком и в Москве (С. М. Рязовым) был использован более адекватный математический подход для исследования флуктуаций автоколебаний. Вместо применения уравнений Эйнштейна—Фоккера для решения флукуационного уравнения использовался обычный спектральный подход. Это позволило решить стоявшие тогда перед теорией вопросы о влиянии фликкер-шумов и об учете периодической нестационарности воздействующих дробовых шумов.

В начале 1954 г. появились квантовые генераторы на молекулах аммиака на волну 1,25 см, созданные Н. Г. Басовым и А. М. Прохоровым. Естественно, что внимание было обращено на возможность их использования в качестве малошумящих усилителей и генераторов. В связи с этим в 1959 г. в Горьком В. М. Плечковым и А. И. Наумовым впервые были изготовлены и запущены два малошумящих генератора на аммиаке и началось их экспериментальное и теоретическое исследование. Изучение шло по двум путям: 1) исследование молекулярных пучков с целью создания более мощных пучков для возбуждения генераторов на слабых линиях, в том числе и на формальдегиде на волну 4 мм и 2) исследование флукуаций колебаний и естественной ширины линии.

Для решения задачи точных измерений шумовых сигналов важен был не столько порог чувствительности, сколько исключение систематических ошибок измерений. Важным элементом этого была реализация точной калибровки, что обеспечивалось лишь тепловыми эталонами радиоизлучения. Поэтому при разработке новых радиометров на 3 и 10 см решались задачи создания точных эталонов теплового радиоизлучения, имеющих достаточно высокую температуру, дости-

гающую 200 и более градусов Цельсия. Такой эталон в волноводном исполнении на волну 3 см был разработан В. Л. Рахлиным на основе нагреваемого в волноводе согласованного клина черного тела. Он долго служил первичным эталоном для калибровки радиометров на эту волну. Одновременно В. М. Плечковым разрабатывался эталон на температуру 1500° в виде лампы специальной конструкции с вольфрамовой нитью накаливания. Лампа помещалась в волновод. Этот эталон являлся вторичным и требовал калибровки по первичному эталону.

В это же время, в основном, силами студентов, было начато создание радиометра на волну 1,63 см, который был введен в действие А. Г. Кисляковым, С. А. Каменской и Л. И. Турабовой в 1954 г. и использовался во время наблюдений затмения Солнца в г. Ново-Московске.

В 1959 г. А. Г. Кисляковым были разработаны и созданы детекторный и супергетеродинный радиометры 4-миллиметрового диапазона волн.

Детекторный радиометр оказался чрезвычайно перспективным для применения в коротковолновой части миллиметрового и в субмиллиметровом диапазонах длин волн. Впоследствии А. И. Наумовым, Ю. А. Дрягиным и Л. И. Федосевым была создана серия радиометров на волны от 1,8 до 0,36 мм.

В результате работ по созданию радиометров возникла идея их использования в качестве точных измерителей мощности слабых сигналов, мощности собственных шумов различных устройств и для калибровки аттенуаторов. На основе исследований и разработок, проведенных В. Л. Рахлиным и А. М. Стародубцевым, в 1954—1960 гг. под руководством Н. А. Сереброва, были созданы первые промышленные радиометры на волны 3 и 10 см. В последующие годы в этом же институте под руководством Н. Н. Холодилова были разработаны серийно выпускаемые диапазонные перестраиваемые радиометры на волны от 2 до 60 см.

1.2. Радиоастрономические наблюдения

В 1952 г. в Зименках уже работали новые радиотелескопы с четырехметровыми параболическими зеркалами на волну 3 и 10 см. С этого времени начались интенсивные радиоастрономические исследования. На новых радиотелескопах В. А. Разиным в 1952 г. были проведены первые в мире в этом диапазоне измерения интенсивности радиоизлучения Кассиопеи-А и Крабовидной туманности; в 1954 г. эти измерения были вновь проведены В. А. Разиным совместно с В. М. Плечковым. В 1954 г. В. А. Разин начал исследования,

направленные на поиски поляризации распределенного космического радиоизлучения. С возникновением теории синхротронного радиоизлучения Галактики стало очевидным, что распределенное космическое радиоизлучение может быть частично поляризовано. Однако степень поляризации принимаемого на Земле радиоизлучения должна быть очень невелика (единицы процентов и менее) из-за нерегулярности магнитных полей в межзвездной среде. Весьма существенным для обнаружения поляризации был учет влияния вращения плоскости поляризации из-за эффекта Фарадея в ионосфере Земли, на что впервые обратил внимание В. А. Разин. Он же предложил эффективный способ использования этого эффекта для надежного выделения поляризованной компоненты: заключавшийся в модуляции ширины полосы и частоты радиометра. Это радикальное усовершенствование радиометра позволило ему летом 1956 г. обнаружить линейную поляризацию распределенного космического радиоизлучения на волне 1,45 м. В 1963 г. В. А. Разину был выдан Диплом на это открытие (№ 26).

Большое место в начале 50-х годов заняли исследования радиоизлучения Солнца во время его затмения. Это позволило получать уникальную разрешающую силу, недостижимую во время никакими средствами. Метод затмения позволял наблюдать локальные источники на Солнце с разрешением, исчисляемым минутами дуги. Кроме того, наблюдение во время затмения давало информацию о радиодиаметре Солнца. Данные, полученные на разных волнах, позволяли строить модели солнечной короны, т. е. зависимость кинетической температуры и концентрации электронов от высоты над фотосферой Солнца. Представляли также интерес измерения распределения радиояркости по диску Солнца. Все эти задачи решались во время ряда экспедиций. Первая такая экспедиция горьковских радиоастрономов состоялась в 1952 г. в поселок Арчман близ Ашхабада Туркменской ССР, где проходила полоса полного затмения Солнца. Там использовался радиотелескоп на 3 и 10 см (рис. 3).

В 1954 г. состоялась экспедиция в район Ново-Московска, где также наблюдалось полное затмение Солнца. В этой экспедиции использовались уже три радиотелескопа: на 1,6; 3 и 10 см. Наконец, весной 1958 г. экспедиция НИРФИ наблюдала затмение Солнца в Китае на острове Хайнань также радиотелескопами на те же волны (рис. 4). В экспедиции, руководимой В. С. Троицким, участвовали А. М. Малахов, В. А. Разин, В. Л. Рахлин, К. С. Станкевич, К. М. Стрежнева, В. В. Хрулев, Н. М. Цейтлин и др.

В 1952 г. были проведены тщательные измерения поглощения в земной атмосфере по ее собственному радиоизлуче-

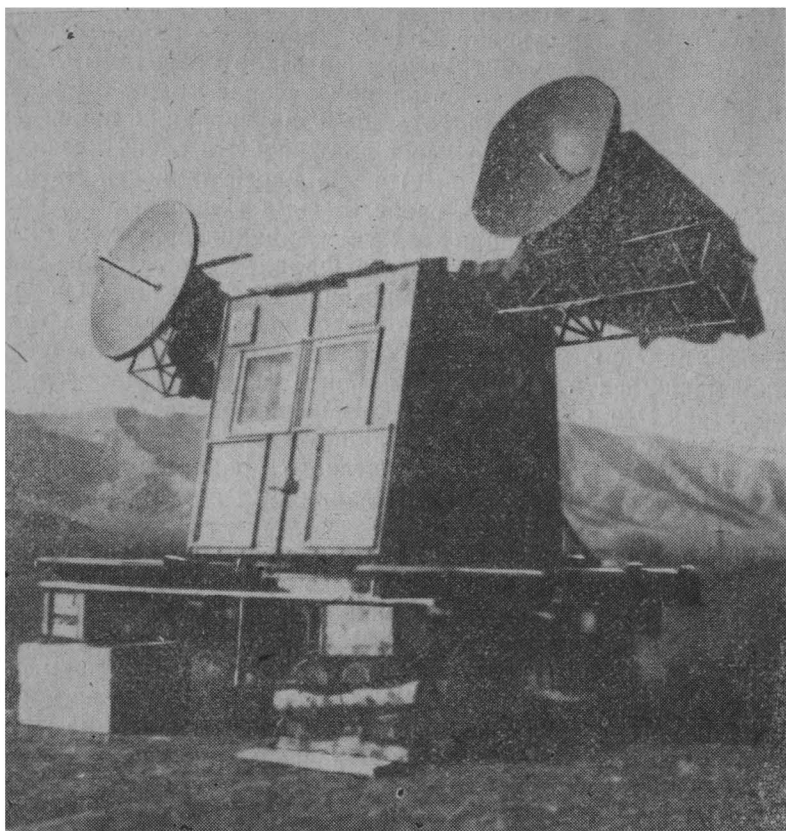


Рис. 3

нию. Измерения проводились в различные сезоны, при различных погодных условиях. В результате были получены многочисленные данные о величине полного поглощения при различных значениях абсолютной влажности у поверхности Земли. Г. С. Горелик обратил внимание Н. М. Цейтлина, проводившего эти исследования, на то, что зависимость поглощения от абсолютной влажности, по-видимому, линейная. Так возник метод раздельного определения поглощения в кислороде (экстраполируя прямую зависимость полного поглощения от влажности к нулевому значению влажности) и в водяном паре (по наклону прямой). Создание этого метода положило начало дальнейшим исследованиям поглощения в атмосфере в широком диапазоне длин волн от миллиметров до десятков сантиметров.

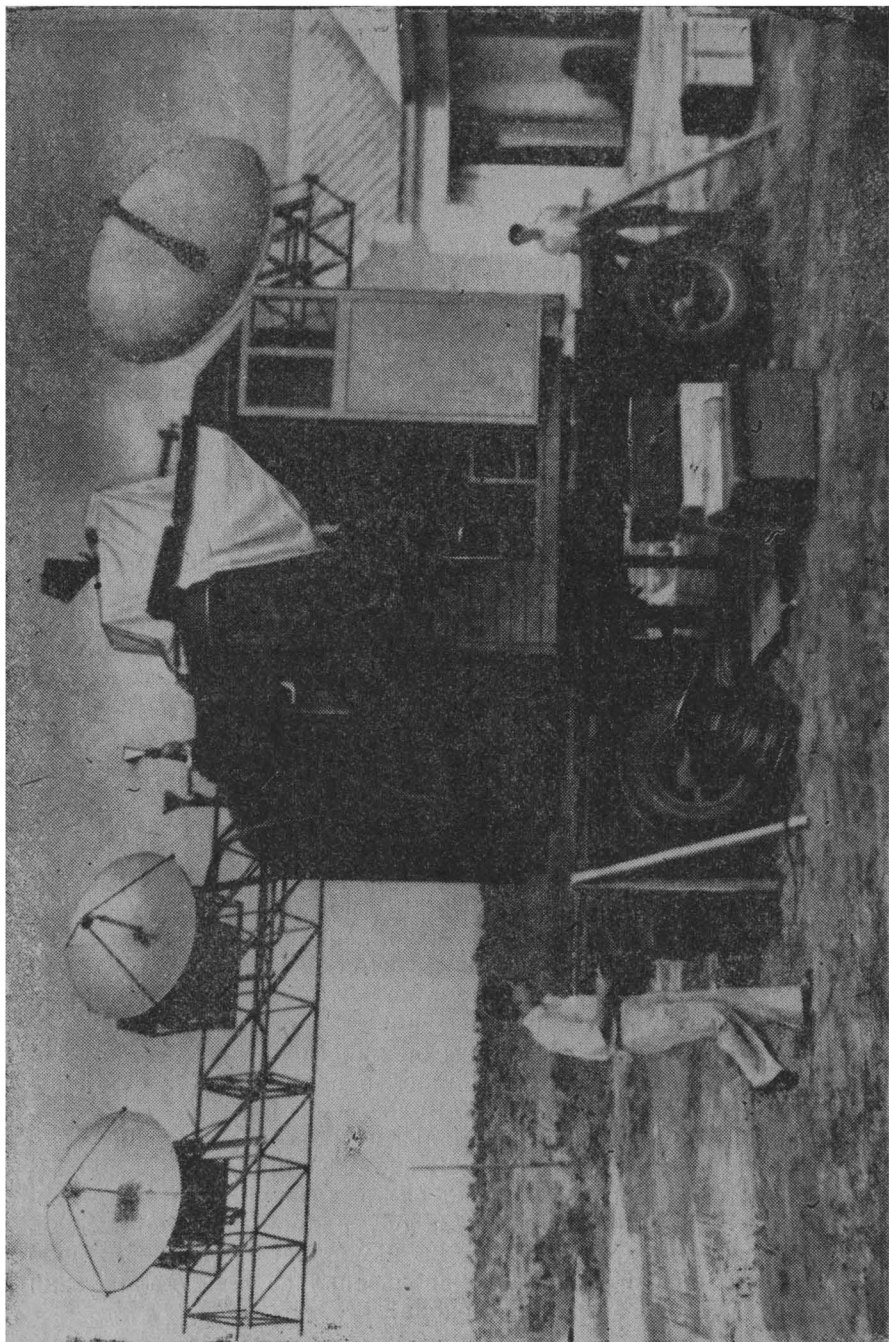


FIG. 4

В 1952—1955 гг. начали развиваться радиоастрономические методы измерения параметров антенн. При радиоастрономических исследованиях, как правило, измерялись диаграммы направленности антенн по радиоизлучению, главным образом, Солнца. В эти же годы В. А. Разиным и В. С. Троицким был предложен и разработан метод измерения потерь в антенном тракте и самой антенне путем измерения собственных шумов антенны.

Радиоастрономические методы исследования антенн развились впоследствии в самостоятельное направление прикладной радиоастрономии; главным образом, благодаря работам горьковских радиоастрономов и радиофизиков (В. С. Троицкий, Н. М. Цейтлин, Д. А. Дмитренко и др.).

Другим направлением радиоастрономических исследований, начавшимся в 1951, 1952 гг. было исследование радиоизлучения Луны, проводившееся под руководством В. С. Троицкого. Новые четырехметровые радиотелескопы позволяли надежно фиксировать тепловое радиоизлучение Луны. К тому времени Пиддингтоном и Миннетом были выполнены замечательные наблюдения за радиоизлучением Луны в течение ее полного цикла на волне 1,25 см. Была обнаружена фазовая зависимость радиоизлучения и, самое главное, что амплитуда колебаний температуры Луны оказалась много меньше, чем по измерениям на инфракрасных волнах. Авторы нашли правильное объяснение, состоявшее в том, что излучение на волне 1,25 см идет не с поверхности, где температурные колебания от лунного дня до лунной ночи составляют 300°К, а из некоторой глубины, где эти колебания затухают почти в пять раз.

Первые наблюдения Луны в Горьком проводились на волне 3 см, однако только на ее восходах и заходах, для определения рефракции и поглощения волн. Эти измерения позволили дать верхнюю оценку амплитуды возможных колебаний температуры Луны, которая оказалась много меньше, чем на волне 1,25 см. Стало очевидным, что эта волна идет из еще более толстого слоя вещества, на глубине которого температурные колебания практически полностью отсутствуют. В. С. Троицким были сделаны оценки свойств верхнего покрова вещества и создана наиболее полная теория радиоизлучения Луны при однородном слое вещества ее верхнего покрова. Затем начались специальные, более точные исследования радиоизлучения Луны. В связи с этим большое внимание было уделено калибровке радиотелескопа по потоку излучения. Для этого использовалось радиоизлучение Солнца, интенсивность которого сначала измерялась на эталонную рупорную антенну, а затем использовалась для калибровки четырехметрового радиотелескопа.

В 1955 г. все это позволило обнаружить и измерить фазовый ход радиоизлучения Луны на волне 3 см. Эти измерения положили начало последующему, более чем десятилетнему циклу исследования Луны в диапазоне от миллиметровых до длинных дециметровых волн. В связи с этим с 1956 г. В. С. Троицким, Н. М. Цейтлиным, а затем также В. Д. Кротиковым и В. А. Порфирьевым начали разрабатываться новые методы точных абсолютных измерений интенсивности сигналов и калибровки антенн радиотелескопов, а А. Г. Кисляков начал создание радиометров миллиметрового диапазона волн. Трудности здесь были огромны, поскольку отсутствовала измерительная аппаратура и необходимые СВЧ элементы 4-миллиметрового диапазона (в частности, кристаллические смесители).

В 1954 г. в Горьком были начаты работы по радиолокации Луны, на актуальность которых указал еще академик Н. Д. Папалекси. Радиолокация Луны на волнах сантиметрового диапазона (10 и 3 см) впервые была осуществлена в 1954—1957 гг. коллективом сотрудников под руководством М. М. Кобриня. Осуществление радиолокации Луны в сантиметровом диапазоне волн было сопряжено с очень большими трудностями, так как в этом диапазоне в отличие от метровых и дециметровых волн в то время еще не были созданы передающие устройства и антенны, обеспечивающие необходимый поток мощности радиоизлучения у цели. Коллективу сотрудников пришлось провести специальные исследования по разработке передающих и приемных устройств. Была разработана методика бистатических локационных измерений при сравнительно малых мощностях излучения и небольшой площади антенн, предусматривающая применение радиометрических устройств для приема отраженного сигнала. Был предложен фазовый метод измерения расстояния до Луны.

Для получения большей мощности излучения был предложен и осуществлен метод сложения мощностей нескольких (двух — четырех) серийно выпускаемых генераторов сантиметрового диапазона с помощью мостовых соединений. Для таких систем удалось получить мощность непрерывного излучения в несколько киловатт и стабильность частоты, лучшую, чем у одиночных генераторов, входящих в систему (Д. И. Григораш, В. С. Ергаков). Были разработаны также методы параметрической стабилизации частоты передатчика, ее контроля по кварцевому гетеродину, а также методика амплитудной манипуляции. Для увеличения чувствительности приемных устройств были разработаны специальные радиометрические приемники с ЛБВ на входе с узкой полосой приема (1,5—3,0 МГц) (В. И. Аникин, И. М. Пузырев). У 3-сантиметрового приемника гетеродин был стабилизирован квар-

цем с помощью системы ФАП. Были сконструированы и изготовлены антенные системы с точными антеннами диаметром 5 м с полуавтоматическим сопровождением (экваториальная установка) (И. В. Мосалов, В. И. Морозов). Передающая установка располагалась на здании института в Горьком, приёмная — на расстоянии 30 км на полигоне «Зименки». Согласование частот передатчиков и гетеродинов приемников осуществлялось с помощью специального канала связи. Измерение мощности передатчика осуществлялось калориметрически, измерения потерь в антеннах и поглощения при распространении радиоволн измерялись с помощью радиометрических приемников. Эффективная мощность шумов приемника, отнесенных ко входу, составляла $(1-4) \cdot 10^{17}$ Вт при времени накопления 60 с. Работа велась с попеременным включением на 3 секунды передатчика и приемника для исключения прямого прохождения сигнала.

В опытах по радиолокации Луны, осуществленных на волне 10 см в июле 1954 г. и на волне 3 см в июне 1957 г., было найдено, что эффективная площадь обратного рассеяния Луны* составляет 0,07 от площади ее поперечного сечения, с чем согласуются более поздние измерения в сантиметровом диапазоне волн, выполненные за рубежом. Обнаружено, что отражение Луной радиоволн сантиметрового диапазона сильно отличается от отражения ею оптических волн. По характеру зависимости сигнала от точности наводки антенн на центр Луны был сделан вывод о том, что отражение происходит, в основном, от центральной части видимого диска Луны.

В рассматриваемый период и в последующие годы в Горьком получили развитие теоретические исследования по радиоастрономии. Существенные результаты были получены В. Л. Гинзбургом, Г. Г. Гетманцевым и В. А. Разиным в теории распределенного космического радиоизлучения и радиоизлучения дискретных источников, В. В. Железняковым в исследовании плазменных механизмов генерации различных типов солнечного радиоизлучения, С. А. Каплагом в исследовании проблем астрофизики. В это же время В. Л. Гинзбургом и Г. Г. Гетманцевым был разработан затменный метод наблюдения Крабовидной туманности, которая в определенные времена покрывается Луной. Этот метод, идея которого высказывалась также Г. С. Гореликом, используется и в настоящее время, позволяя реализовывать угловое разрешение порядка долей секунды.

* Отношение мощности некоторого всенаправленного источника излучения, находящегося на месте наблюдаемого объекта и создающего у приемной антенны ту же плотность потока мощности, что и наблюдаемый объект, к плотности потока мощности падающего излучения у объекта.

2. НОВЫЙ ПЕРИОД РАЗВИТИЯ РАДИОАСТРОНОМИИ В г. ГОРЬКОМ

Существенное расширение возможностей радиоастрономических исследований было связано с образованием в 1956 г. Научно-исследовательского радиофизического института на основе ряда отделов ГИФТИ и научно-исследовательских групп Политехнического института, в частности, отдела Г. С. Горелика (которым к тому времени заведовал В. С. Троицкий, т. к. Г. С. Горелик, в 1955 г. перешел на работу в Москву в Физико-технический институт) и отдела электродинамики СВЧ М. Т. Греховой.

Создание института, свидетельствовавшее о признании важности и перспективности фундаментальных и прикладных радиоастрономических исследований, дало новый мощный толчок развитию радиоастрономии в г. Горьком. Существенно увеличился приток специалистов. Сразу же при создании НИРФИ на базе бывшего отдела Г. С. Горелика были созданы два радиоастрономических отдела: отдел СВЧ радиоастрономии, которым заведовал В. С. Троицкий, и отдел длинноволновой радиоастрономии и физики ионосферы во главе с Г. Г. Гетманцевым; из отдела М. Т. Греховой выделился отдел М. М. Кобрин, занимающийся исследованиями радиоизлучения Солнца. В последующие годы из отдела СВЧ радиоастрономии выделились три новых подразделения: в 1963 г. отдел галактической и внегалактической радиоастрономии (В. А. Разин), в 1967 г. отдел прикладной радиоастрономии (Н. М. Цейтлин), в 1971 г. лаборатория и с 1975 г. отдел радиоастрономии миллиметровых волн¹ (А. Г. Кисляков). Из отдела Г. Г. Гетманцева выделились в 1965 г. отдел Е. А. Бенедиктова и в 1976 г. отдел В. О. Рапопорта, в которых, помимо исследований в области распространения радиоволн и физики плазмы, занимаются декаметровым радиоизлучением Солнца и мощных дискретных источников.

Значительное развитие получила материальная база радиоастрономии: расширился и оснастился радиоастрономическим оборудованием полигон «Зименки» (с 1971 г. лаборатория «Зименки»), в 1964 г. были основаны радиоастрономические станции НИРФИ на Кара-Даге (Крым) и в Старой Пустыни (Горьковская область), а в 1965 г. — радиоастрономическая база НИРФИ в районе Васильсурска (Горьковская область), позднее преобразованная в лабораторию НИРФИ «Васильсурск».

Были начаты целенаправленные систематические и широкие радиоастрономические исследования по целому ряду направлений: исследования радиоизлучения Луны, Солнца, атмосфер, поляризации космического радиоизлучения, интен-

сивности и спектров радиоизлучения дискретных источников, исследования и разработки в области прикладной радиоастрономии. Эти работы проводились на основе соответствующих теоретических, методических, аппаратурных и антенных исследований и разработок.

Ниже будут охарактеризованы основные радиоастрономические станции и лаборатории НИРФИ и основные направления радиоастрономических исследований.

2.1. Лаборатория НИРФИ «Зименки»

Начальный этап создания и развития «Зименок» был описан выше. В 1957 г. в Зименках был установлен 5-метровый полноповоротный радиотелескоп миллиметрового диапазона волн (П. Д. Калачев, И. В. Мосалов, В. И. Морозов и др.). Напомним, что к этому времени здесь уже работали два радиотелескопа сантиметрового (3 и 10 см) диапазона с 4-метровыми антеннами и радиотелескоп на волну 1,45 м.

В 1958 г. были начаты работы по созданию комплексов для исследования космического радиоизлучения в декаметровом диапазоне волн и исследования ионосферы радиоастрономическими методами (Е. А. Бенедиктов, В. В. Беликович, Л. М. Ерухимов, Ю. С. Коробков и др.), а также строительство двух 15-метровых полноповоротных радиотелескопов и комплекса лабораторных и жилых зданий (М. М. Кобрин, А. А. Петровский, В. С. Журавлев, Л. В. Гришкевич, И. С. Мотин и др.).

В 1959 и 1960 гг. было проведено исследование спектров распределенного космического радиоизлучения и спектров дискретных источников, а также спорадического радиоизлучения Солнца в декаметровом диапазоне волн (Г. Г. Гетманцев, Е. А. Бенедиктов, В. В. Беликович, Ю. С. Коробков, А. И. Тарасов и др.).

В эти же годы введены в эксплуатацию основные производственные сооружения Зименок, первый жилой дом и дорога от Зименок до деревни Великий Враг, имеющей хорошее сообщение с магистралью Горький — Казань.

В 1962 г. в Зименках уже работали ЭВМ БЭСМ-2 (И. М. Пузырев и др.) и криогенная станция (И. С. Мотин и др.). Было завершено строительство двух 15-метровых радиотелескопов РТ-15 (рис. 5).

В том же 1963 г. Е. А. Бенедиктовым были начаты исследования радиоизлучения Кассиопеи-А на декаметровых волнах с использованием синфазных антенных решеток, продолжавшиеся вплоть до 1975 г.

В 1964 г. на обрывистом берегу Волги в Зименках был установлен эталонный металлический 4-метровый диск, по-



Рис. 5

крытый поглощающим материалом («черный» диск или так называемая «искусственная Луна»). Под обрывом расположился 4-метровый радиотелескоп, с помощью которого в сантиметровом диапазоне волн были весьма точно измерены интенсивности радиоизлучения Луны и дискретных источников (В. С. Троицкий, Н. М. Цейтлин, А. М. Стародубцев, В. Д. Кротиков, В. М. Плечков, В. А. Порфирьев, С. А. Шмулевич, К. М. Стрженева, В. А. Алексеев, Д. А. Дмитренко, Ю. И. Матвеев, Н. И. Михайлова, Н. И. Сергеева и др.).

В том же году в Зименках были проведены спектрографические исследования спорадического радиоизлучения Солнца в декаметровом диапазоне волн (В. О. Рапопорт и др.).

Исследования радиоизлучения Солнца стали основными радиоастрономическими работами, проводимыми в Зименках: начиная с 1964 г. здесь были обнаружены и исследованы квазипериодические флуктуации радиоизлучения Солнца (М. М. Кобрин, О. И. Юдин, М. С. Дурасова, В. М. Шумкина, Г. А. Лавринов и др.).

В 1966 г. в Зименках были начаты систематические наблюдения радиоизлучения Солнца в широком диапазоне от сантиметровых до метровых радиоволн (О. И. Юдин, Т. С. Подстригач, В. Я. Яшков, Ю. В. Веденеев, М. С. Дурасова, Н. М. Прытков и др.) и выпущен первый ежемесячный бюллетень НИРФИ «Радиоизлучение Солнца» (станция Зименки). В последующие годы систематические наблюдения за радиоизлучением Солнца («Радиоастрономическая служба Солнца») были значительно усовершенствованы: с 1970 г. они были дополнены спектрографическими наблюдениями спорадического радиоизлучения в широком диапазоне волн (Ю. В. Веденеев, Н. М. Прытков, К. М. Шмелев и др.); в 1976 г. созданы комплексы, состоящие из радиотелескопов соответственно сантиметрового и дециметрового диапазонов, и эталонных «черных» дисков, обеспечивших высокую точность патрульных наблюдений потоков радиоизлучения Солнца (см. рис. 5) (О. И. Юдин, М. С. Дурасова, Т. С. Подстригач, Ю. В. Веденеев, Н. М. Прытков, Г. И. Лупехин, Г. А. Лавринов, В. С. Петрухин и др.).

В 1967 г. в Зименках был построен и введен в эксплуатацию уникальный радиотелескоп миллиметрового диапазона РТ-25 пассажного типа с зеркалом $2 \times 25 \text{ м}^2$, обладавший до последнего времени наивысшим в мире разрешением на миллиметровых волнах — на волне 2 мм — 20 угл. сек по азимуту и 5 угл. мин по высоте (А. Г. Кисляков, И. В. Мосалов, В. П. Горбачев, В. Н. Глазман, К. М. Корнев, В. И. Чернышев и др.). На этом радиотелескопе проводятся радиоастрономические исследования в миллиметровом диапазоне волн (рис. 6).

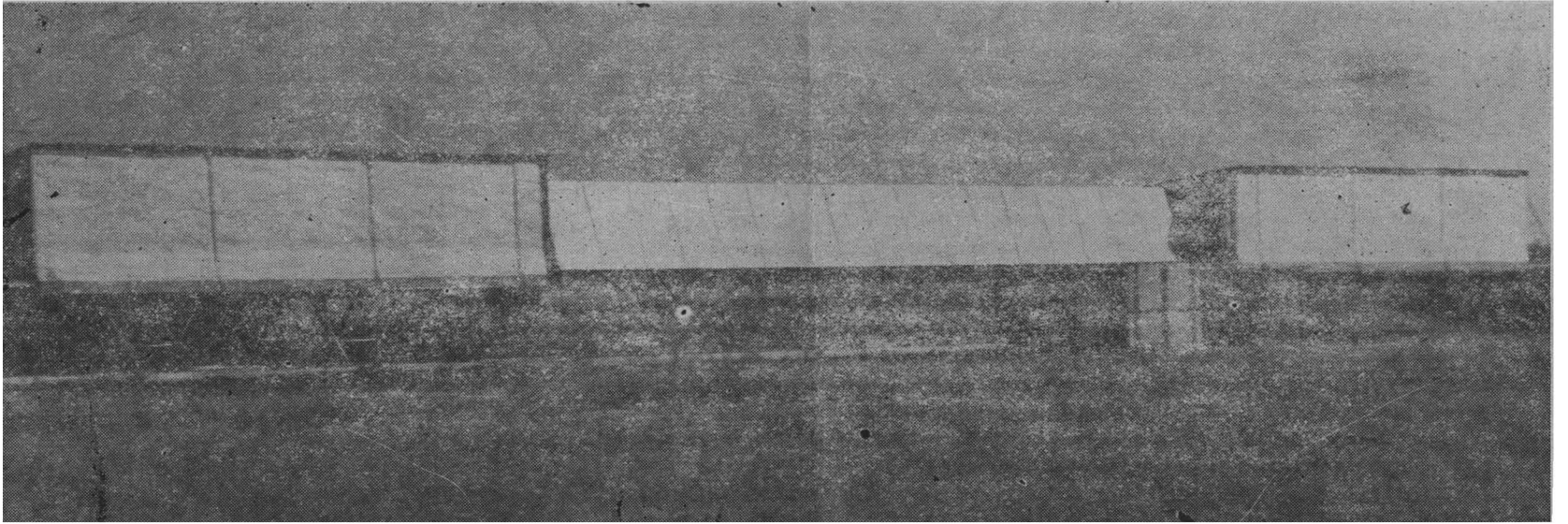


Рис. 6

За создание инструментов «Службы Солнца» и радиотелескопа РТ-25 ряд сотрудников НИРФИ был удостоен медалей ВДНХ (О. И. Юдин, М. С. Дурасова, Т. С. Подстригач, А. Г. Кисляков, И. В. Мосалов, В. И. Чернышев, В. Н. Глазман, И. А. Родионов, Н. В. Бахарев, В. П. Горбачев, К. М. Корнев, Г. Н. Немцов).

С течением времени доля радиоастрономических наблюдений среди исследований, проводимых в Зименках, уменьшилась в связи со значительным ростом исследований в области распространения радиоволн и физики ионосферы.

2.2. Радиоастрономическая станция НИРФИ «Кара-Даг»

Радиоастрономическая станция НИРФИ «Кара-Даг» была создана для реализации наиболее точных абсолютных измерений интенсивности радиоизлучения Луны и мощных дискретных источников в сантиметровом диапазоне волн. Для обеспечения таких измерений В. С. Троицкий и Н. М. Цейтлин в 1957 г. был предложен метод сравнения принимаемого радиоизлучения с эталонным радиоизлучением «черной» площадки. Реализовать такую площадку можно было, наблюдая под углом Брюстера излучение склона горы, где располагался также металлический диск, отражавший в антенну радиотелескопа «холодное» радиоизлучение из области зенита. Калибровочным сигналом служила разность интенсивностей излучения от «черной» площадки и металлического листа.

Удобный рельеф оказался на берегу Черного моря между Планерским и Судаком, где в 1957—1959 гг. проводились измерения в экспедиционных условиях (В. С. Троицкий, Н. М. Цейтлин, В. А. Порфирьев, В. Л. Рахлин и др.). Измерения эти, однако, не обеспечивали достаточной точности из-за дифракционного «потепления» металлического листа (радиоизлучение Земли попадало в дифракционную диаграмму листа и отражалось в антенну радиотелескопа). Поэтому в 1960 г. было решено использовать в качестве эталонов «черные» диски, наблюдаемые под достаточно большим углом к горизонту, чтобы экранировать «холодные» области радиоизлучения атмосферы. Первый эксперимент был проведен в 1960 г. в экспедиции в Ялте, где полуметровый диск был установлен на крыше гостиницы «Ореанда», а в 200 м от него располагались радиотелескопы на 3 (зеркало диаметром 1,5 м) и 10 см. Угловой диаметр диска был равен угловому диаметру Луны (что облегчало точное определение потока радиоизлучения Луны), поэтому диск был назван «искусственной Луной». Для учета влияния радиоизлучения Земли (так называемой дифракционной поправки) кроме радиоиз-

лучения «черного» эталонного диска использовалось также радиоизлучение экрана с отверстием, равным диску (В. С. Троицкий, В. А. Порфирьев, В. Д. Кротиков). После соответствующих расчетов дифракционной поправки, проведенных Н. М. Цейтлиным, удалось избавиться от необходимости использования экрана с отверстием, и измерения стали вестись путем сравнения лишь с эталонным радиоизлучением «черного» диска. Так возник метод «черного» диска (или метод «искусственной Луны»), один из наиболее точных методов абсолютных измерений интенсивности сигналов.

Поскольку для размещения «черного» диска необходима высокая мачта или гора, то по экономическим соображениям точные измерения интенсивности радиоизлучения Луны и дискретных источников наиболее удобно было вести в горных условиях. Наиболее подходящим местом для проведения экспедиции в горных условиях после длительных исследований был выбран район в восточной части Крыма. В 1961 г. состоялась большая экспедиция в г. Судак (В. С. Троицкий, Н. М. Цейтлин, К. С. Станкевич, В. Д. Кротиков, В. А. Порфирьев, Л. Н. Бондарь, К. М. Стрежнева и др.), где на скале около Генуэзской крепости была расположена «искусственная Луна», теперь уже диаметром 4 метра. Радиотелескопы были расположены на берегу на расстоянии около 400 метров от диска. Основной задачей экспедиции было исследование Луны на волнах 3 и 10 см с целью определения возможного градиента температуры в глубину. В то же время использовались уже серийные радиометры на 3 и 10 см, о которых говорилось выше. Кроме исследования Луны, в экспедиции впервые были начаты измерения потока радиоизлучения Кассиопей-А на волне 3 см с использованием метода «искусственной Луны». Измерения были очень трудны, т. к. сигнал в единичном замере не выделялся из шумов. Были выполнены сотни замеров. Это позволило заложить эпоху в определении интенсивности Кассиопей-А, точность измерения которой была в то время наивысшей. В результате работы этой экспедиции впервые было надежно определено возрастание температуры в глубину Луны, за что В. С. Троицкий и В. Д. Кротиков получили Диплом на это открытие.

В начале 1961 г. В. А. Разин и Н. М. Цейтлин предложили провести прецизионные измерения по методу «черного» диска потоков наиболее мощных дискретных источников не только на волне 3 см, но и на волнах дециметрового диапазона, т. е. составить точный каталог потоков этих источников в широком диапазоне длин волн.

Для реализации этой программы и программы В. С. Троицкого по исследованию радиоизлучения Луны в 1962 г. состоялась вторая экспедиция в г. Судак. Использовались ра-

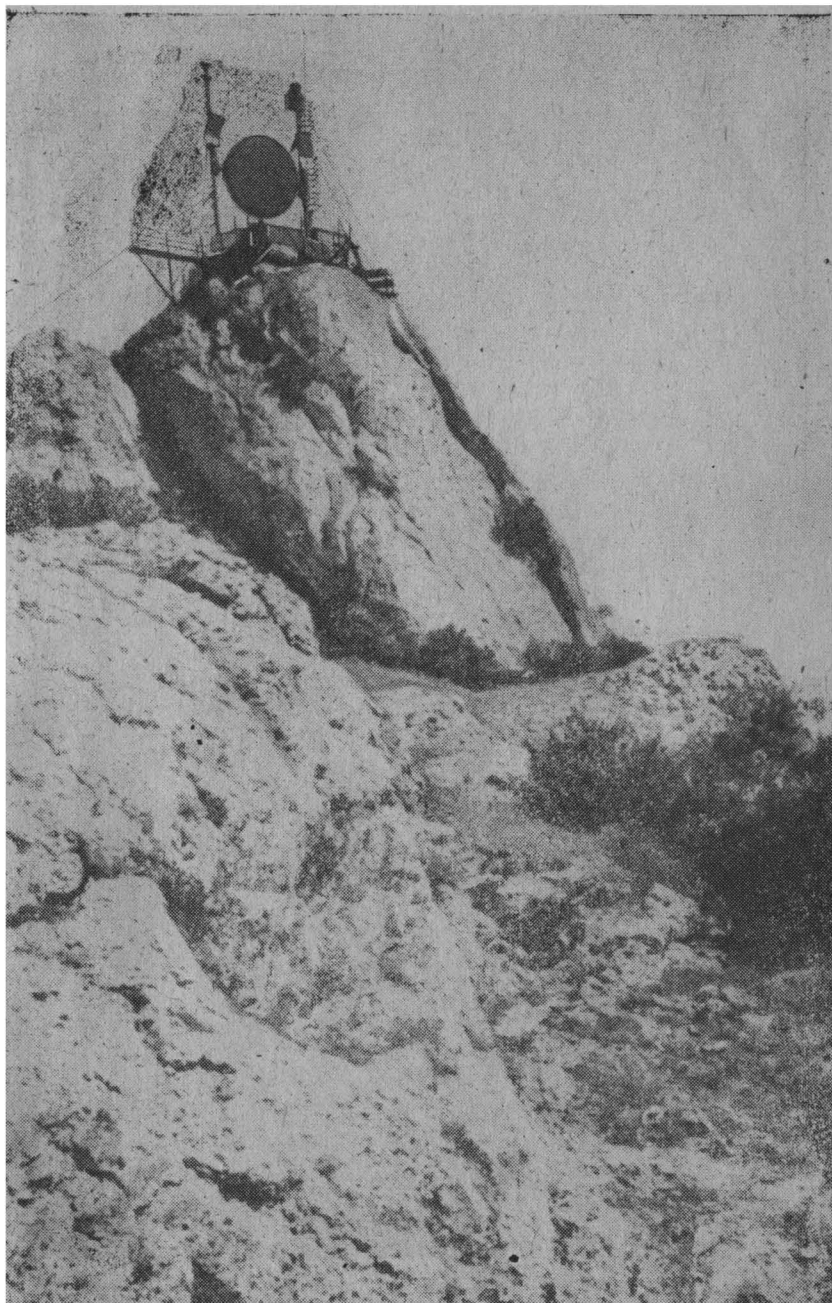


Рис. 7

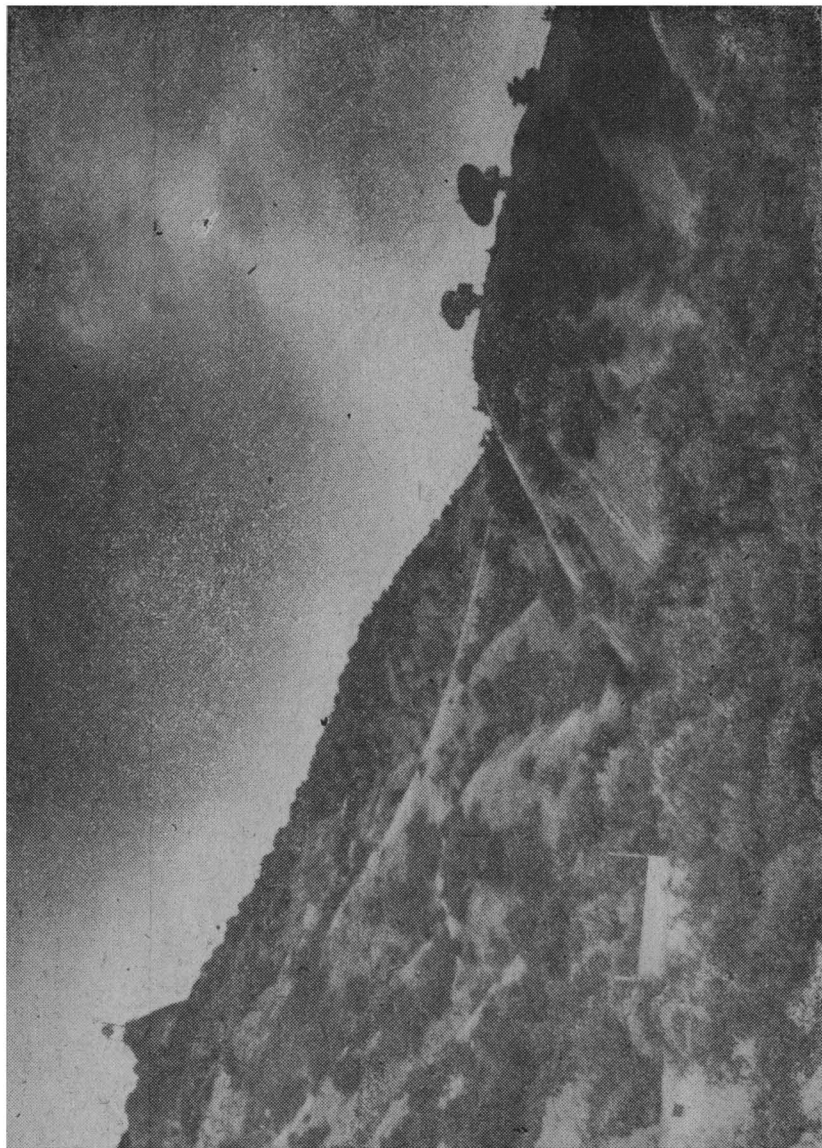


Рис. 8

диотелескопы сантиметрового и дециметрового диапазонов волн. Применение радиотелескопов больших размеров требовало увеличения расстояния до диска, что уже невозможно было выполнить в Судаке, поэтому в 1962 г. было выбрано место в Крымском приморье, в долине Кара-Дага, где в 1962—1964 гг. проведено было измерение потоков радиоизлучения Луны и дискретных источников на дециметровых волнах. Однако и здесь расстояния были ограничены, поэтому были предложены поиски удобной горы и места около нее, отдаленного на километр, что диктовалось применением антенн большого размера. Дело в том, что расстояние от антенны до диска должно быть более, чем $2D^2/\lambda$ (D — диаметр антенны, λ — длина волны). Кроме того, гора должна быть достаточно высокой, чтобы угол наблюдения «искусственной Луны» был как можно больше. Очень удобное место было выбрано В. А. Порфирьевым в соседнем ущелье, в сторону дороги Судак — Феодосия, в урочище массива Кара-Даг. Сначала казалось даже невозможным установить диск на очень подходящей скале, так неприступно она выглядела. Однако осенью 1965 г. уже были начаты систематические измерения потоков Луны и мощных дискретных источников в дециметровом диапазоне длин волн. Была изготовлена и установлена новая «искусственная Луна» диаметром 5 метров (рис. 7).

В 1965, 1966 гг. были введены в действие радиотелескопы с зеркалами диаметром 4 и 12 метров, подведена линия электропередачи, построены деревянные лабораторные и жилые дома. Так возникла постоянно действующая радиоастрономическая станция НИРФИ «Кара-Даг» (рис. 8), руководимая ныне К. С. Станкевичем.

В последующие годы на этой станции был установлен еще один радиотелескоп с точным 7-метровым зеркалом, а также созданы многочастотный интерферометр метрового диапазона и стенд для изучения спорадического радиоизлучения магнитосферы Земли. Здесь проводились и проводятся систематические радиоастрономические исследования интенсивности и спектра радиоизлучения дискретных источников, в частности, изучение эволюции остатков сверхновых звезд, реликтового фона и т. п.

2. 3. Радиоастрономическая станция НИРФИ «Старая Пустынь»

Радиоастрономическая станция НИРФИ в Старой Пустыни была основана В. А. Разиным в 1964 г. с целью обеспечения исследований поляризации и спектра галактического радиоизлучения.

Первые поляризационные наблюдения были выполнены в

Старой Пустыни с 8-метровым полноповоротным радиотелескопом в 1965 г. на частотах 920, 735, 510 и 437 МГц (В. А. Разин, А. Н. Родионов, В. В. Хрулев и др.). В 1966—1969 гг. проведены измерения спектрального индекса галактического радиоизлучения на метровых волнах (Г. Г. Гетманцев, А. Г. Тарасов, Сазонов и др.) и измерения потоков мощных дискретных источников на частотах 920, 735 и 510 МГц (В. А. Разин, В. Т. Федоров). Экспериментальная база в Старой Пустыни год от года наращивалась и модернизировалась. В 1967 г. был введен в действие 12-метровый радиотелескоп (в 1975 г. его диаметр был увеличен до 14 метров), затем в 1970, 1971 гг. построен 7-метровый радиотелескоп и в 1980, 1981 гг. еще два 14-метровых радиотелескопа на дециметровый и метровый диапазоны радиоволн. Теперь в Старой Пустыни имеются три 14-метровых радиотелескопа, объединенных в поляризационный интерферометр с переменной базой (рис. 9).

На этих радиотелескопах выполнен ряд исследований фундаментального и прикладного характера, в частности, получены наиболее полные из существующих в мире данные о спектре и распределении линейно-поляризованного радиоизлучения в нескольких областях неба (В. А. Разин, А. И. Теплых, Л. В. Попова и др.), обнаружено вековое уменьшение плотности потока Крабовидной туманности (В. А. Разин, Е. Н. Виняйкин и др.), разработан и регулярно используется предложенный В. А. Разиным метод измерения полной электронной концентрации на луче зрения в ионосфере по наблюдениям фарадеевского вращения плоскости поляризации галактического радиоизлучения (А. И. Теплых, Л. В. Попова, Л. А. Добрушский), проведен цикл исследований поглощения в атмосфере Земли по ее собственному радиоизлучению, позволивший существенно уточнить и на ряде волн исправить результаты прежних измерений (В. В. Хрулев, А. И. Теплых, С. А. Волохов, И. П. Кузнецова, Д. А. Дмитриенко и др.).

В 1967—1971 гг. в Старой Пустыни были введены в эксплуатацию два полноповоротных радиотелескопа с 7-метровыми антеннами сантиметрового и дециметрового диапазонов волн и две 25-метровые вышки с эталонными «черными» дисками, расположенные на расстоянии 100 и 50 метров от радиотелескопов (В. С. Журавлев, Е. А. Миллер, И. В. Мосалов и др.) (рис. 10). На этих радиотелескопах был реализован предложенный Н. М. Цейтлиным метод точных абсолютных измерений потоков радиоизлучения путем фокусировки антенн (при их калибровке) на диск, расположенный в зоне Френеля (Н. М. Цейтлин, А. А. Романычев, Д. А. Дмитриенко и др.). С помощью этого метода были осуществлены точные абсолютные измерения потоков наиболее мощных

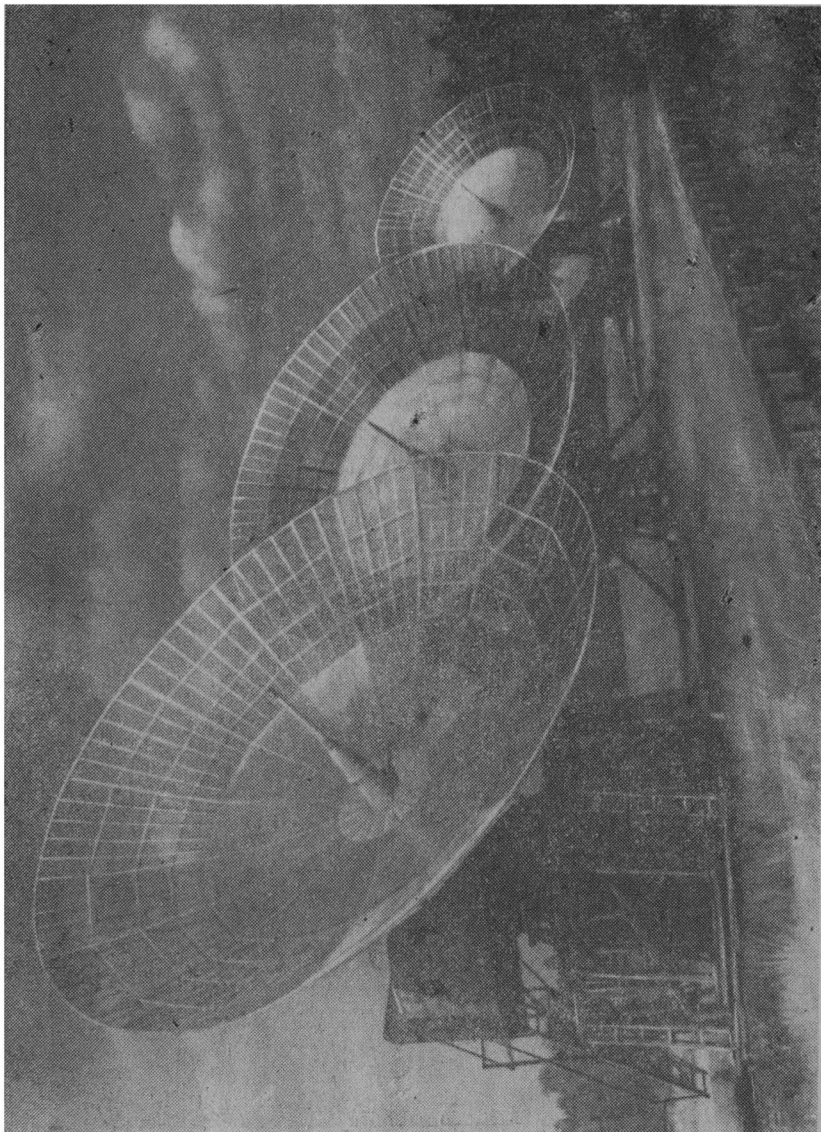


FIG. 9

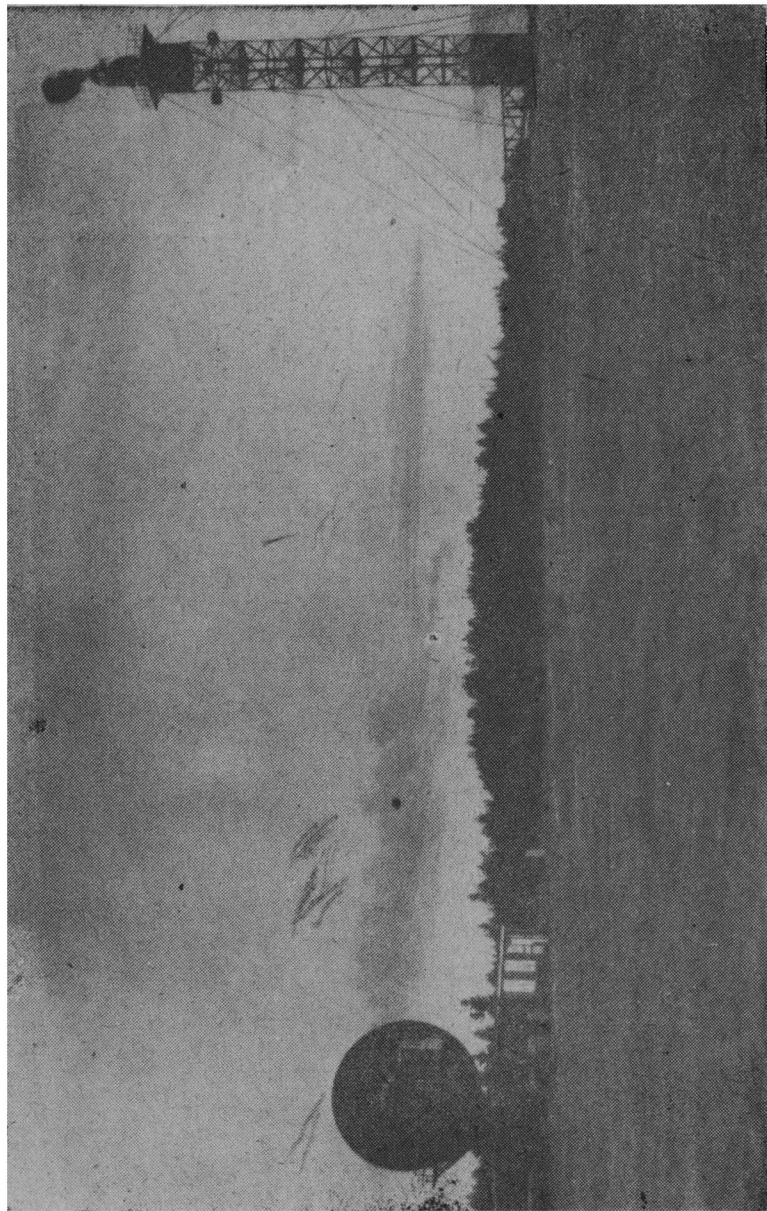


Рис. 10

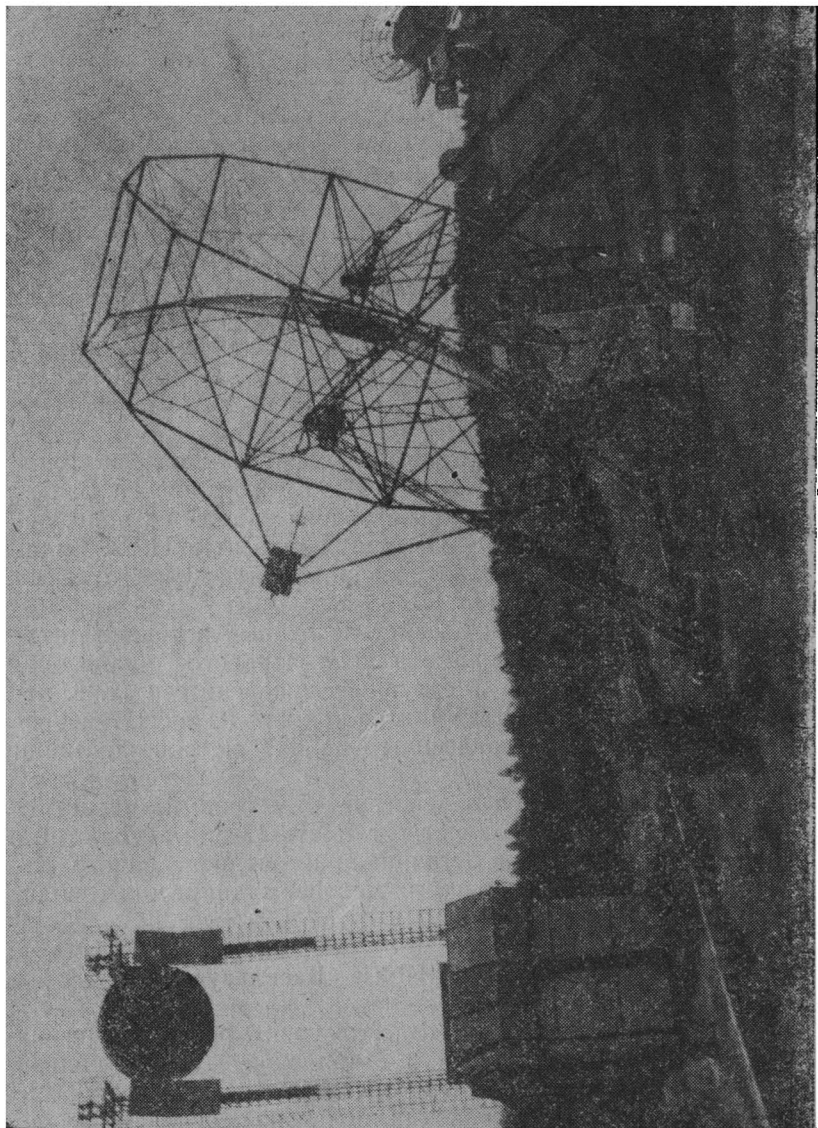


Рис. 11

дискретных источников: Кассиопеи-А, Лебедя-А, Тельца-А (Крабовидной туманности) и Девы-А в диапазоне волн от 3 до 100 см (Н. М. Цейтлин, Д. А. Дмитренко, Л. В. Дмитренко, В. В. Снегирева, Л. К. Иванникова и др.). Полученные спектры вместе с аналогичными спектрами, измеренными на Кара-Даге тем же методом, но с диском, расположенным в дальней зоне, позволили создать наиболее точную шкалу спектров первичных эталонов радиоизлучения.

В результате этих измерений были обнаружены частотная зависимость векового уменьшения потока Кассиопеи-А (1969 г., Н. М. Цейтлин, Д. А. Дмитренко, Л. В. Дмитренко), особенности и переменность в спектре радиоизлучения Крабовидной туманности в сантиметровом диапазоне волн (Н. М. Цейтлин, Л. В. Дмитренко, В. В. Снегирева, 1965—1978 гг.). На этих же инструментах были разработаны новые радиоастрономические и амплифазометрические методы исследования антенн (Н. М. Цейтлин, Д. А. Дмитренко, А. А. Романьчев, В. И. Турчин, Ю. И. Белов, Н. А. Дугин, А. Л. Фогель, В. С. Коротков и др.).

В 1978 г. создан 12-метровый радиотелескоп вантово-стержневой конструкции РТВС-12 (И. В. Мосалов, Н. В. Бахарев, Н. А. Дугин и др.) дециметрового диапазона волн, основанный на предложенных И. В. Мосаловым и Н. В. Бахаревым новых предварительно-напряженных конструкциях зеркальных антенн (рис. 11).

В 1980, 1981 гг. введен в действие первый в стране двух-элементный радиоинтерферометр дециметрового диапазона, работающий как система апертурного суперсинтеза (т. е. использующий вращение Земли) и состоящий из двух 7-метровых радиотелескопов, разнесенных на 417 метров по линии восток — запад.

В эти же годы введен в действие 5-метровый «черный» диск, предназначенный совместно с РТВС-12 для абсолютных измерений интенсивности источников и распределенного радиоизлучения в дециметровом и метровом диапазонах волн.

2.4. Лаборатория НИРФИ «Васильсурск»

Загородная лаборатория «Васильсурск» расположена на границе Горьковской области и Марийской АССР вблизи слияния рек Волги и Суры. Она организована в 1965 г.

С первых шагов становления полигона «Васильсурск» во главе всех начинаний стоял Г. Г. Гетманцев. Под его руководством в лаборатории создана хорошо оснащенная база научных исследований в области нелинейных явлений в ионосфере, радиоастрономии и ионосферного распространения

радиоволн, основу которой составляет построенный в 1980 г. экспериментальный комплекс «Сура».

В 1968, 1969 гг. был введен в эксплуатацию радиотелескоп метрового диапазона волн с антенной 30×50 м (вращающийся по азимуту), ось которой направлена под углом 19° к горизонту. В эти же годы был введен в действие 8-метровый полноповоротный радиотелескоп дециметрового диапазона волн.

На крупном радиотелескопе в 1971—1973 гг. было исследовано спорадическое радиоизлучение Солнца с помощью спектрографа с частотным сканированием в районе длины волны 3 м (В. А. Зиничев),

В 1973—1979 гг. выполнен цикл экспериментов по исследованию спектра космического радиоизлучения на базе параболических радиотелескопов метрового и дециметрового диапазонов радиоволн. Получены новые данные об угловых вариациях спектрального индекса нетеплового радиоизлучения Галактики с относительно высоким для подобных экспериментов угловым разрешением 7° (Ю. В. Токарев, А. Ф. Тарасов и др.).

3. ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ, ПРОВОДИМЫХ В НИРФИ

3.1. Радиоастрономические исследования Луны

*В. С. ТРОИЦКИЙ, А. Г. КИСЛЯКОВ, В. Д. КРОТИКОВ,
В. Н. НИКОНОВ, Н. М. ЦЕЙТЛИН, Л. И. ФЕДОСЕЕВ и др.*

Экспериментальные исследования радиоизлучения Луны были начаты на полигоне «Зименки» в 1950 г.

В течение последующих двух десятилетий выполнен большой цикл экспериментальных и теоретических исследований, в результате которого:

— разработаны ряд радиотелескопов и высокочувствительная радиометрическая аппаратура для приема радиоизлучения Луны в диапазоне длин волн от 0,87 мм до 70 см;

— разработан новый метод «искусственной Луны», позволивший существенно повысить точность радиоастрономических измерений;

— получены данные о температурном режиме, составе и структуре верхнего покрова Луны в слое толщиной до 10 см;

— определены тепловые и электрические характеристики лунного грунта;

— обнаружен рост температуры в глубь Луны и доказано

существование у Луны горячих недр (Диплом на открытие № 43 с приоритетом от 19 ноября 1962 г.).

На основании проведенных исследований предложена модель лунного грунта, которая использовалась при проектировании посадочных ступеней автоматических межпланетных станций серии «Луна» и самоходного шасси Лунохода.

Результаты наземных радиоастрономических исследований подтверждены прямыми измерениями, выполненными на поверхности Луны, и лабораторными исследованиями физических характеристик лунного грунта.

3.2. Радиоастрономические исследования Солнца

*М. М. КОБРИН, А. Ф. КИСЛЯКОВ, О. И. ЮДИН, Т. С. ПОДСТРИГАЧ,
М. С. ДУРАСОВА, Ю. А. ВЕДЕНЕЕВ, Н. М. ПРЫТКОВ,
В. О. РАПОПОРТ, В. М. ФРИДМАН, А. И. КОРШУНОВ,
В. В. ПАХОМОВ и др.*

В НИРФИ впервые созданы солнечные радиоспектрографы, перекрывающие диапазон от 1 до 12 ГГц с частотным разрешением 60—100 МГц. На радиотелескопах диаметром 22 м (ФИАН и КРАО АН СССР) совместно с сотрудниками этих обсерваторий проведена серия экспериментальных исследований структуры спектров радиоизлучения локальных источников и всплесков.

Благодаря высокому частотному разрешению обнаружены тонкие спектральные особенности в радиоизлучении Солнца. Теоретическое рассмотрение моделей активных областей показало, что одной из причин возникновения тонкой структуры может быть влияние нейтральных токовых слоев, широко привлекаемых в настоящее время для объяснения механизма возникновения солнечных вспышек.

Проведенные исследования открывают новые перспективные пути изучения центров активности на Солнце, в частности поиска и диагностики нейтральных токовых слоев.

На базе уникальной Т-образной антенны декаметрового (ДКМ) диапазона УТР-2 вблизи г. Харьков силами НИРФИ и ИРЭ АН УССР создан и действует солнечный радиоастрономический комплекс (в составе радиоспектрографа, двумерного гелиографа и радиометров), позволяющий с высоким разрешением регистрировать динамические спектры своеобразных ДКМ радиовсплесков, а также местоположения и размеры их источников в солнечной короне.

С помощью радиоастрономического комплекса на базе УТР-2 ведутся исследования основных свойств спорадического излучения Солнца в ДКМ диапазоне 10—26 МГц. Получены важные экспериментальные данные относительно гармонических мод излучения всплесков III типа, гармонической

структуры двойных событий типа IIIb+III и динамики возбуждающих эти всплески электронных потоков.

Обнаружено новое, чрезвычайно интересное явление — радиоэхо коротких узкополосных всплесков (stria) в короне и установлена генетическая связь диффузных stria-всплесков с парами stria+эхо. При наблюдениях с гелиографом выяснилось, что лимбовый диффузный stria за время жизни (5 с) перемещается на 1,5—2 солнечных радиуса в глубь короны.

Полученные научные результаты значительно расширяют представление о физических условиях в верхней короне и механизмах генерации солнечного спорадического излучения.

Обнаружены и исследованы квазипериодические флюктуации радиоизлучения Солнца, стимулировавшие подобные исследования в других обсерваториях, в частности на Кубе и в ГДР.

Служба Солнца

Начиная с 1966 г. в Зименках ведутся патрульные радиоастрономические наблюдения Солнца на частотах 9100, 2950, 950, 650, 200 и 100 МГц. В результате проведенных исследований на базе полученного материала:

а) исследована зависимость между яркостными критериями солнечных вспышек и всплесками радиоизлучения Солнца сантиметрового диапазона,

б) установлены временные связи между радиовсплесками и излучением в мягком рентгене,

в) установлена эмпирическая зависимость между интенсивностью потоков протонов с энергиями 5, 10, 30, 60 МэВ и интегральным значением потоков радиовсплесков на волне 3 и 10 см,

г) обнаружена статистическая зависимость между максимальной интенсивностью потоков высокоэнергичных протонов, генерируемых в солнечных вспышках, и временем распространения основной массы протонов до Земли: с увеличением времени распространения интенсивность потоков протонов уменьшается. Связь существенно улучшается для протонных событий, сопровождавшихся микроволновыми всплесками близкой интенсивности. При том же времени распространения более интенсивными являются протонные потоки, сопровождавшиеся всплесками I типа метрового диапазона. Обнаруженная зависимость может быть использована для более точного прогноза протонных потоков,

д) создана методика прогноза протонных потоков по параметрам радиовсплесков.

Начиная с 1978 г. совместно с Институтом прикладной геофизики проведена серия экспедиций на НИС «Профессор Визе» с целью исследования возможности организации патрульных наблюдений радиоизлучения Солнца в сантиметровом

вом диапазоне в условиях океана. Результаты хорошо согласуются с данными наблюдений наземных станций, что свидетельствует о реальности организации солнечного патруля на НИС. С учетом акваторий Атлантического и Тихого океанов интервал наблюдений Солнца можно расширить до 24 часов.

3.3. Исследования радиоизлучения дискретных источников

*В. С. ТРОИЦКИЙ, В. А. РАЗИН, Н. М. ЦЕИТЛИН,
К. С. СТАНКЕВИЧ и др.*

а) Абсолютные измерения плотности потоков.

Абсолютная шкала спектров.

На полигонах «Кара-Даг» и «Старая Пустынь» более 20 лет ведутся регулярные абсолютные радиоастрономические измерения плотностей потоков мощных дискретных источников (Кассиопея-А, Лебедь-А, Телец-А, Дева-А) и планеты Юпитер. Для этого используются радиотелескопы малых диаметров (7—14 м), калибруемые по радиоизлучению абсолютно «черных» дисков, установленных как во фраунгоферовой зоне антенны («Кара-Даг»), так и на близких расстояниях — в зоне Френеля (Ст. Пустынь). В результате этих измерений получены прецизионные (погрешность порядка единиц процентов) спектры упомянутых наиболее мощных дискретных источников, общепризнанные во всем мире в качестве эталонных. Эти первичные эталоны являются основой для создания единой для северного и южного полушарий абсолютной шкалы спектров вторичных и третичных калибровочных источников. На крупных антеннах, прокалиброванных по первичным эталонам, измерено распределение энергии по спектру у 11 источников из каталогов Кэмбриджа и Паркса, имеющих на частоте 1 ГГц поток 10^{-25} Вт/м² Гц, которые образуют группу вторичных эталонов. С помощью этих источников определяются параметры антенн с диаметром 60—70 м. По системе эталонов НИРФИ были измерены параметры уникального радиотелескопа с 70-метровым квазипараболическим зеркалом.

б) Эволюция радиоизлучения остатков сверхновых.

В течение 20 лет проводились исследования эволюции радиоизлучения молодых остатков сверхновых. Для точного определения изменений в распределении интенсивности по спектру частот использовались развитые в НИРФИ методы абсолютных и относительных радиоастрономических измерений на Кара-Даге и в Ст. Пустыни; ряд исследований выполнен на антеннах с высоким разрешением.

В результате обнаружено вековое падение плотности по-

тока у остатков сверхновых в Крабовидной туманности, туманностях Тихо Браге, Кеплера, составляющие доли процента в год.

У молодого остатка сверхновой Кассиопея-А обнаружены: зависимость скорости уменьшения потока от частоты, вариации спектральных индексов во времени, сильные изменения скорости падения потока во времени, интенсивные линии в ограниченном интервале частот в спектре радиоизлучения метрового диапазона.

У остатка сверхновой в Крабовидной туманности (Телец-А) обнаружена переменность величины плотности потока, достигающая 15—20% с периодом порядка нескольких лет.

Методом лунных покрытий (1964 и 1974 гг.) изучалась структура Крабовидной туманности. Обнаружены изменения в распределении радиояркости и смещение центра тяжести радиоизлучения, показана связь этих явлений с активностью центральной области туманности, содержащей пульсар.

в) Поляризация радиоизлучения дискретных источников.

С помощью радиотелескопа РАТАН-600 и разработанного в НИРФИ облучателя с переключением линейной поляризации получены одномерные распределения линейного поляризованного радиоизлучения Крабовидной туманности, двухкомпонентного ядра радиогалактики Центавр-А и Луны на волне 13 см с разрешением $2'$ в направлении восток — запад. Полученные данные вместе с результатами наблюдений на других волнах свидетельствуют о немонотонной зависимости интегральной степени линейной поляризации северо-восточной компоненты от длины волны и о большой разности в мерах вращения компонент ядра Центавра-А.

3. 4. Исследования поляризации и спектра радиоизлучения

*В. А. РАЗИН, В. В. ХРУЛЕВ, А. А. МЕЛЬНИКОВ, Л. В. ПОПОВА,
Е. Н. ВИНЯЙКИН, А. И. ТЕПЛЫХ и др.*

После обнаружения в 1955—1956 гг. линейной поляризации галактического радиоизлучения (Зименки, $\lambda = 1,45$ м) основные поляризационные исследования проводились в Старой Пустыни.

Наблюдения линейно-поляризованного галактического радиоизлучения являются эффективным методом исследования физических условий в Галактике. Угловое распределение поляризованного радиоизлучения по небу и частотный спектр поляризованных параметров дают информацию о распределении ионизированного газа и релятивистских электронов в

межзвездном пространстве, а также о структуре галактического магнитного поля.

На РАС в Старой Пустыни были проведены исследования углового распределения и частотных спектров «поляризованных» областей в Петле III (ПО 147+8), в Северном галактическом выступе и в окрестности Полярной звезды; изучена зависимость их угловых размеров от длины. В направлении ПО 147+8 ($\delta=60^\circ$, $\alpha=4^h 30^m$) обнаружено яркое пятно линейно-поляризованного радиоизлучения с поляризационной температурой 20% от полной температуры неба на частоте 334 МГц; установлен немонотонный характер зависимости степени поляризации радиоизлучения ПО 147+8 от частоты.

В результате одновременных измерений угловых распределений линейно-поляризованного и неполяризованного галактического радиоизлучения на частоте 334 МГц и интерференционных измерений на частоте 200 МГц обнаружена антикорреляция температур указанных компонент и пропорциональность температуры полного радиоизлучения эффективному размеру галактического диска. Таким образом, непосредственно экспериментально установлено, что линейно-поляризованное радиоизлучение генерируется во всей толще галактического диска.

Совокупность всех полученных в НИРФИ результатов поляризационных исследований в диапазоне 100—1000 МГц и данных о распределении яркостной температуры неба на частотах 85, 150, 829 МГц показывает, что магнитное поле Галактики до расстояний 3—10 кпк от Солнца в секторе с долготами $l=70\text{—}180^\circ$ при $l>0^\circ$ вытянуто вдоль галактической плоскости и имеет петлевую структуру. Регулярная, составляющая поля направлена к $l=55^\circ$. Дисперсия направлений межзвездного магнитного поля по галактической широте много меньше единицы, а по долготе 0,5.

С учетом анизотропии синхротронного излучения межзвездной среды в магнитном поле указанной структуры удастся объяснить распределение яркостной температуры неба в рамках простой модели излучающего диска в виде эллипсоида вращения с полуосями 14 и 0,8 кпк (без интенсивного радиогало).

В направлении на Северный полюс Галактики вклад радиогало на частоте 85 МГц составляет не более 15% от полной температуры неба и уменьшается с ростом частоты. Анализ показывает также, что в секторе $l=70\text{—}180^\circ$ не наблюдаются ярко выраженные радиорукава.

В 1965—1980 гг. был выполнен цикл работ по исследованию спектра нетеплового радиоизлучения в диапазоне частот 6,3—375 МГц (Г. Г. Гетманцев, В. А. Разин, А. Г. Тарасов, Ю. В. Токарев и др.). Полученные экспериментальные дан-

ные связаны с крупномасштабной радиоструктурой Галактики и позволили уточнить наши сведения об источниках, объемах накопления и характере движения космических лучей, а также об интенсивности и спектре метагалактического радиоизлучения.

Выполнен анализ эффективности различных механизмов нетеплового космического радиоизлучения.

3. 5. Исследование реликтового излучения

А. Г. КИСЛЯКОВ, К. С. СТАНКЕВИЧ и др.

Для доказательства космологического происхождения фонового реликтового излучения требовалось измерить спектр и установить, насколько он соответствует излучению абсолютно черного тела с температурой $\sim 3^\circ\text{K}$. В решении этой проблемы первостепенное значение имели работы НИРФИ. Для точных абсолютных измерений фоновых излучений был разработан метод, использующий радиоизлучение охлаждаемых поглощающих эталонов. С его помощью температура реликтового фона была измерена на длинах волн: 3,58 мм (1968), 8,2 мм (1967 совместно с ФИАН), 3,2 см (1966), 8,9 (1969), 15, 20,9 и 30 см (1968 г.); на некоторых волнах данные получены впервые. Для измерения на длинных волнах был применен метод экранирования космического радиоизлучения Лунной, а соответствующие наблюдения проведены на волнах 47 и 73 см с 64-метровым радиотелескопом в Парксе (Австралия). В результате было показано, что в рэлей-джинсовской части спектр полностью соответствует излучению черного тела с температурой $2,7^\circ\text{K}$. Была показана также высокая степень мелкомасштабной изотропии до 0,01%. Эти измерения были выполнены на длине волны 11 см с разрешением $8'$ на 64-метровом радиотелескопе в Парксе.

3.6. Исследования в миллиметровом диапазоне волн

*А. Г. КИСЛЯКОВ, Л. И. ФЕДОСЕЕВ, А. Н. НАУМОВ,
Ю. В. ЛЕБСКИЙ и др.*

Радиоастрономические исследования в ближнем миллиметровом диапазоне длин волн ($\lambda \leq 4$ мм) были начаты в г. Горьком А. Г. Кисляковым в 1954 г. К 1960 г. в НИРФИ были созданы модуляционный радиометр на волну 4,1 мм с супергетеродинным приемником и широкополосный ($\lambda = 3 \div 7$ мм) детекторный радиометр. С помощью этих радиометров А. Г. Кисляковым были получены данные о фазовой зависимости радиоизлучения Луны на волне 4,1 мм, а также о

спектре радиоизлучения Солнца в интервале длин волн 3—7 мм. При этом была разработана методика калибровки радиотелескопов миллиметрового диапазона длин волн по радиоизлучению атмосферы с учетом специфики этого диапазона, а также проведены детальные исследования зависимости атмосферного поглощения в 4-миллиметровом диапазоне длин волн от метеопараметров и высоты места наблюдений над уровнем моря (А. Г. Кисляков, В. Н. Никонов, К. М. Стрежнева).

В дальнейшем в НИРФИ была разработана уникальная серия радиометров на волны 1,8 мм (А. И. Наумов), 1,3 мм; 0,67 мм и 0,74 мм (Ю. А. Дрягин, Л. И. Федосеев), с помощью которых проводились наблюдения Луны и Солнца, а также исследовалось атмосферное поглощение радиоволн (Л. М. Кукин, Л. В. Лубяко, Л. И. Федосеев). На этом этапе исследований были получены данные о фазовой зависимости радиоизлучения Луны во всем интервале длин волн от 0,87 до 4 мм. В результате показана адекватность однослойной модели Луны для описания изменений ее радиоизлучения во время лунаций.

Исследования радиоизлучения Солнца и Луны в 4-миллиметровом диапазоне длин волн были затем продолжены в совместных работах НИРФИ и ФИАН с помощью РТ-22 Окской радиоастрономической станции и аппаратуры НИРФИ. В результате была показана радиометрическая однородность экваториального пояса Луны и в то же время обнаружены определенные отличия в физических свойствах верхнего покрова «морей» и «материков» (А. Г. Кисляков, Б. Я. Лосовский, А. Е. Саломонович). Выполнены первые наблюдения источников S-компоненты на Солнце с высоким угловым разрешением одновременно на волнах 4 и 8 мм (А. Г. Кисляков, А. Е. Саломонович). В этот же период А. Г. Кисляковым, А. Д. Кузьминым и А. Е. Саломоновичем проведены пионерские исследования радиоизлучения Венеры на волне 4,1 мм. Показано, что излучение Венеры на этой волне исходит из слоя атмосферы планеты с температурой $\sim 390^\circ\text{K}$ (т. е. существенно выше температуры верхнего слоя облаков), что говорило о значительном проникании миллиметровых радиоволн в атмосферу Венеры.

Исследования солнечного радиоизлучения в интервале длин волн 1,35—17 мм (А. Г. Кисляков, В. А. Ефанов, И. Г. Моисеев, Л. И. Фифосеев и др.) позволили получить данные о спектре S-компоненты и протуберанцев в этом диапазоне, а также некоторые сведения о проявлении солнечных вспышек. Спектр S-компоненты в интервале длин волн 1,24—4 мм соответствует спектру теплового тормозного излучения. В области 4—6 мм спектральный индекс меняется

и источники S-компоненты становятся оптически тонкими. Получен богатый статистический материал об источниках S-компоненты. Протуберанцы во всем интервале миллиметровых радиоволн наблюдаются как «потемнения» по отношению к уровню «спокойного» Солнца. Контраст их убывает с уменьшением длины волны.

Спектры интенсивностей радиоизлучения Венеры, Марса, Меркурия; Юпитера, Сатурна, Нептуна, полученные в совместных с КраО АН СССР исследованиях (А. Г. Кисляков, В. А. Ефанов, И. Г. Моисеев, А. И. Наумов, В. Н. Воронов, И. И. Зинченко и др.), позволили сделать ряд заключений об условиях в атмосферах и на поверхностях планет. Яркостная температура диска Венеры резко изменяется в интервале длин волн 2—13,5 мм. На коротковолновой границе этого интервала она лишь незначительно превышает эффективную температуру наружного слоя облаков Венеры, в то время как в длинноволновой области она уже приближается к температуре в нижнем (с высотой над поверхностью $h \approx 30$ км) слое атмосферы Венеры. Сопоставление результатов наблюдений с расчетами по данным АМС «Венера» дает хорошее согласие.

Спектр яркостной температуры Марса в интервале длин волн 2—13,5 мм, вместе с данными оптических и других радионаблюдений, позволил получить некоторые данные о параметрах верхнего слоя этой планеты. Показано, что плотность верхнего слоя вещества Марса вдвое превышает плотность лунного грунта, в то же время радиоволны глубже проникают в марсианский грунт, чем в лунный. Эти выводы были подтверждены в дальнейшем данными космических исследований Марса. Исследования планет-гигантов показали, что их яркостные температуры в диапазоне миллиметровых радиоволн значительно превышают равновесные температуры планет.

Совместно с Крымской астрофизической обсерваторией АН СССР был выполнен также первый в нашей стране и наиболее полный в то время обзор дискретных источников радиоизлучения на волне 4 мм. Спектры ряда галактических источников, квазаров и радиогалактик были продолжены в миллиметровый диапазон длин волн.

Создание радиотелескопа РТ-25Х2 позволило провести обзор темных туманностей на ряде волн миллиметрового диапазона с целью обнаружения их излучения в континууме. Этот поиск в некоторых случаях дал положительные результаты. Существование конденсаций в темных туманностях Галактики было подтверждено затем наблюдениями на РТ-22 КраО АН СССР, наблюдениями в субмиллиметровом диапазоне длин волн, а также нашло косвенное подтверждение в

результатах наблюдений в линиях изотопов молекулы CO (А. Г. Кисляков, Б. Е. Тернер, М. А. Гордон). Последние наблюдения выполнены совместно с сотрудниками НРАО США на радиотелескопе НРАО. При этом обнаружены также новые линии молекул и показано существование цианамида в центре Галактики (А. Г. Кисляков, Б. Е. Тернер, Х. С. Лист, Н. Кайфу). Континуальный спектр излучения конденсаций в темных туманностях соответствует излучению оптически тонкого поглощающего слоя (по-видимому, пыли).

Создание РТ-25Х2 позволило также получить ряд результатов в исследованиях распределения яркости по диску «спокойного» Солнца, в том числе данные о краевых эффектах на волне 4,1 мм и о хромосферной грануляции при одновременных наблюдениях на волнах 1,35 и 4,1 мм.

С 1977 г. радиоастрономические исследования в ближнем миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн были продолжены в Институте прикладной физики АН СССР, организованном в г. Горьком на базе ряда подразделений НИРФИ. Этот период характеризуется переходом от спектроскопии грубого разрешения к спектроскопии с высоким (10^{-5} – 10^{-6}) относительным разрешением по частоте. В ИПФ АН СССР созданы многоканальные спектрометры 2- и 3-миллиметрового диапазонов длин волн со стабилизированными гетеродинами на основе ЛОВ (А. Б. Буров, В. Н. Воронов, А. А. Красильников, Н. В. Серов). Это позволило провести первые в СССР наблюдения таких межзвездных молекул как HCN и CO (совместно с МВТУ им. Н. Баумана (А. Г. Кисляков, А. А. Парщиков, Б. А. Розанов и др.)). Обнаружение линий HCN в излучении темных туманностей заставило пересмотреть прежние оценки нижнего предела плотности водорода в этих объектах.

Применение многоканальных спектрометров в атмосферных исследованиях позволило завершить исследование телурических линий вращательного спектра озона в диапазоне длин волн 1,3–3,3 мм, начатое еще в НИРФИ (А. Б. Буров, Ю. Ю. Куликов, Л. И. Федосеев и др.). При этом показана возможность дистанционного контроля полного содержания и вертикального профиля озона, в том числе в ночное время и при наличии легкой облачности. Радиоастрономические методы измерений атмосферного поглощения радиоволн использовались также в систематических наблюдениях (А. Г. Кисляков, Л. И. Федосеев и др.), результаты которых дают основу для составления прогнозов величины сигнала в линиях связи «Земля — Космос». Последняя работа выполнена совместно с ИРЭ АН СССР (В. Ф. Заболотный, И. И. Зинченко, И. А. Исхаков, А. В. Соколов, Е. В. Сухонин, В. И. Чернышев).

3.7. Разработка, исследование и внедрение методов радиоастрономии

а) Радиоинтерферометрия сверхвысокого разрешения (В. С. Троицкий, В. Н. Никонов, В. А. Алексеев, Э. Н. Гатэлук, В. Д. Кротиков, А. Е. Крюков и др.).

В течение 1965—1981 гг. были созданы аппаратурные комплексы радиоинтерферометров независимого приема на частоты 6, 9, 25, 86, 327, 408, 5300 и 22235 МГц (В. С. Троицкий, В. Н. Никонов, В. Д. Кротиков, В. А. Алексеев, Э. Н. Гатэлук, А. Е. Крюков и др.). С 1969 г. начаты астрофизические исследования с использованием крупных радиотелескопов страны. Впервые измерен угловой размер источника «Кассиопея-А» в декаметровом диапазоне волн; в измерениях угловых размеров космических мазеров на волне 1,35 см с базой 1100 км реализовано угловое разрешение $\sim 10^{-3}$ угл. с.; методом интерферометрии космических мазеров осуществлена синхронизация разнесенных шкал времени с погрешностью $\sim 10^{-7}$.

Разработаны методические и технические основы нового научного направления — прецизионной радиоастрометрии с применением радиоинтерферометров со сверхдлинной базой (РСДБ).

Предложены: метод апертурно-частотного синтеза для получения радиоизображений космических источников со сверхвысоким угловым разрешением; метод дифференциальной длиннбазовой радиоинтерферометрии для установления небесной и земной систем координат, измерения скорости вращения Земли и движения полюсов, изучения приливов в земной коре, прецизионно-нутационных движений, тектонических и сейсмических проявлений; принципы космической радиоастрометрии. Потенциальная точность указанных решений с применением РСДБ более чем на 2 порядка выше достижимой другими средствами измерений.

б) Радиоастрономические методы исследования антенн (В. С. Троицкий, Н. М. Цейтлин, Д. А. Дмитренко и др.).

Еще в 1955 г. в работах НИРФИ впервые были предложены радиоастрономические методы для исследования и определения энергетических параметров антенн. В дальнейшем в результате исследований, проведенных в НИРФИ, эти методы были развиты применительно к сложным антенным системам, в том числе интерферометрическим и фазометрическим.

В 60-х годах в НИРФИ была проведена разработка радиоастрономических и радиометрических методов, использующих для определения параметров антенн не только внеземные источники, но и радиоизлучение поглощающих и рассеи-

вающих поверхностей. Наилучшие точности достигнуты при исследованиях антенн с помощью предложенного и разработанного в НИРФИ метода, использующего радиоизлучение абсолютно черных дисков, расположенных как во фраунгоферовой, так и френелевой зонах антенны.

Измеренные в НИРФИ потоки радиоизлучения первичных и вторичных источников позволяют определить параметры целого ряда типов антенн с рекордной точностью (погрешность порядка 5%).

Проведенное под руководством НИРФИ внедрение этих методов на промышленных предприятиях при разработке и производстве антенн, а также в других организациях при эксплуатации антенных систем, оказалось весьма эффективным.

Радиоастрономические и радиометрические методы антенных измерений во многих приложениях имеют ряд преимуществ, а иногда и единственно возможны.

На основе исследований НИРФИ это направление успешно развивается в целом ряде организаций нашей страны. Приоритет и ведущая роль НИРФИ в разработке, исследовании и внедрении радиоастрономических методов измерения параметров антенн общепризнаны.

в) Радиоастрономические методы исследования параметров тропосферы (В. С. Троицкий, С. А. Жевакин, Н. М. Цейтлин, В. А. Разин, А. Г. Кисляков, К. С. Станкевич, В. В. Хрулев, Д. А. Дмитренко, А. В. Троицкий, А. П. Наумов и др.).

В 1948—1952 гг. в Горьком были предложены и разработаны методы раздельного измерения поглощения в водяном паре и кислороде тропосферы по ее собственному радиоизлучению.

В течение последующих 25 лет в НИРФИ были проведены наиболее полные из известных в мире исследования поглощения и собственного радиоизлучения тропосферы в диапазоне от миллиметровых до метровых волн. В этом диапазоне получены спектры поглощения и собственного радиоизлучения тропосферы и исследована их зависимость от метеоусловий, что весьма существенно для радиосвязи, радиолокации и других приложений.

Работы НИРФИ стимулировали радиометрические исследования тропосферы в ряде организаций страны.

В результате многолетних исследований радиоизлучения тропосферы в НИРФИ была показана возможность определения температуры, полного водозапаса и влагосодержания тропосферы путем приема ее радиоизлучения одновременно на ряде частот. В течение последних 15 лет были разработаны радиометрические методы зондирования тропосферы, алгоритмы решения обратных задач, принципы построения

приемной аппаратуры: Это привело к созданию многоканальной радиометрической системы, позволяющей оперативно и непрерывно получать сведения о физическом состоянии атмосферы: профилях температуры и влажности, интегральном содержании жидкой и парообразной воды, высоте облаков.

Разработанные в НИРФИ аппаратура и методы дистанционного зондирования атмосферы позволили выполнить ряд важных метеорологических исследований в тропических зонах Атлантического и Тихого океанов, в Заполярье.

Выполнены дистанционные исследования пространственных (мезомасштабных) и временных (часовых) вариаций полной массы водяного пара и водозапаса облаков.

г) Радиоастрономический поляризационно-фарадеевский метод исследования ионосферы (В. А. Разин, А. И. Теплых, Л. В. Попова).

Одной из важнейших характеристик ионосферы является полное электронное содержание на луче зрения (N_p). Существует ряд методов измерения N_p , среди которых особое место по точности и оперативности занимает определение N_p по фарадеевскому вращению плоскости поляризации линейно-поляризованного радиоизлучения источников, расположенных за пределами ионосферы. В качестве таких источников применяются, как правило, геостационарные ИСЗ. Вместе с тем весьма перспективным из-за своей экономичности и простоты является радиоастрономический поляризационно-фарадеевский метод, в котором используется радиоизлучение «поляризованных» областей Галактики.

Первые измерения N_p радиоастрономическим поляризационно-фарадеевским методом на радиоастрономической станции НИРФИ в Старой Пустыни были выполнены в 1970 г. С 1976 г. эти измерения ведутся регулярно на волне $\lambda=1$ м. В качестве источников используются «поляризованная» область с координатами $\delta=61^\circ$, $\alpha=4^h 30^m$ и область Полярной звезды.

К настоящему времени получен обширный материал о поведении N_p в ночное время вблизи максимума солнечной активности; зарегистрировано эпизодическое появление относительного ночного максимума N_p , изучена его статистика:

Дата поступления статьи
15 ноября 1982 г.

Альберт Григорьевич *Кисляков*
Владимир Андреевич *Разин*
Всеволод Сергеевич *Троицкий*
Наум Моисеевич *Цейтлин*

РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В г. ГОРЬКОМ

Подписано в печать 21.03.83 МЦ 17374. Формат 60×90¹/₁₆. Бумага типографская № 2. Печать высокая. Усл. печ. л. 3+вкл. Тираж 150 экз. Заказ 3284. Бесплатно.

Дзержинская типография Горьковского областного управления издательств, полиграфии и книжной торговли, Дзержинск, пр. Циолковского, 15