

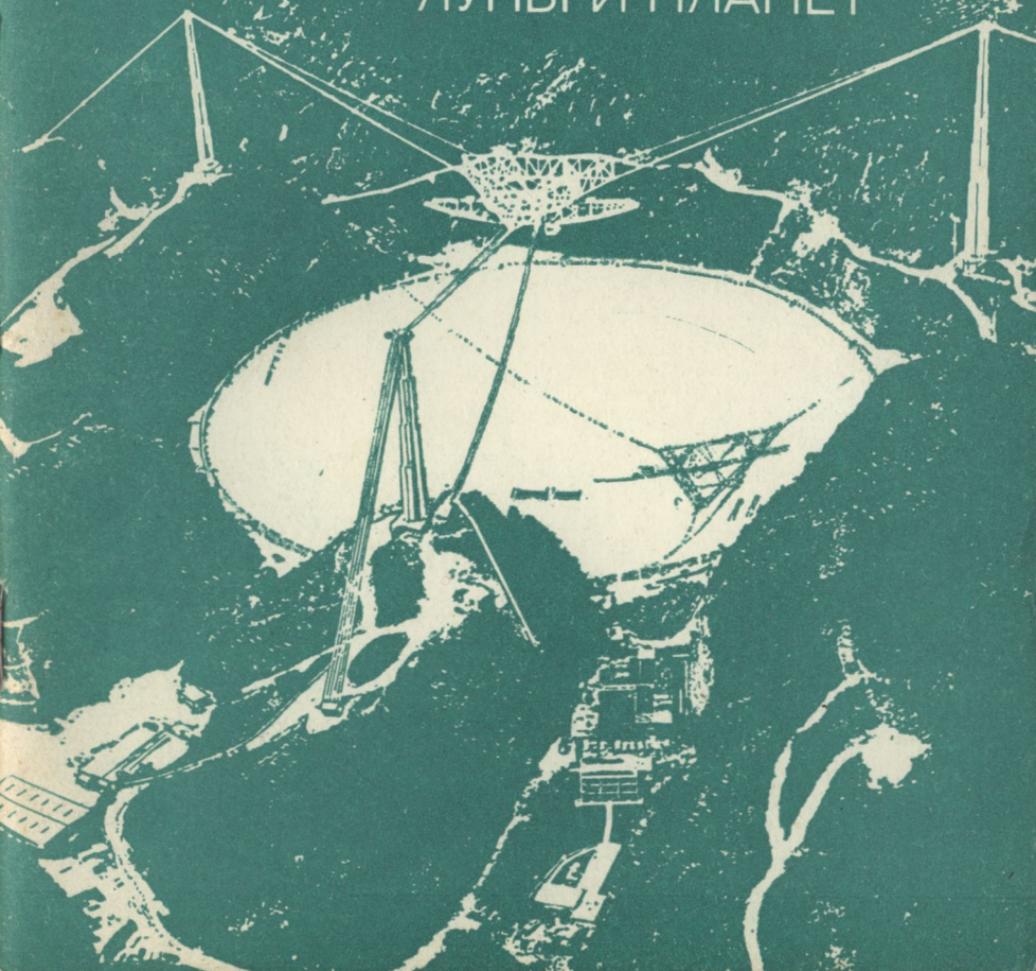
НОВОЕ
В ЖИЗНИ, НАУКЕ,
ТЕХНИКЕ

ЗНАНИЕ

4/1976

СЕРИЯ
КОСМОНАВТИКА, АСТРОНОМИЯ

Н.Н. Крупенио
РАДИО-
ФИЗИЧЕСКИЕ
ИССЛЕДОВАНИЯ
ЛУНЫ И ПЛАНЕТ



НОВОЕ В ЖИЗНИ, НАУКЕ, ТЕХНИКЕ

Серия «Космонавтика, астрономия»

№ 4, 1976 г.

Издается ежемесячно с 1971 г.

Н. Н. Крупенио,

кандидат физико-математических наук

**РАДИОФИЗИЧЕСКИЕ
ИССЛЕДОВАНИЯ
ЛУНЫ И ПЛАНЕТ**

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЗНАНИЕ»

Москва 1976

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Методы радиоастрономических исследований Луны и планет	6
Радиолокация Луны и планет	12
Радиотелескопы и радиолокаторы	19
Антенны	20
Приемники	31
Передачики	35
Устройства наведения антенн и обработки принятых сигналов	36
Результаты радиоисследований Луны и планет	38
Меркурий	38
Венера	41
Марс	47
Юпитер	50
Сатурн	56
Уран, Нептун, Плутон	57
Луна	58
Заключение	62

Крупенио Н. Н.

К 84 Радиофизические исследования Луны и планет. М., «Знание», 1976.

64 с. (Новое в жизни, науке, технике. Серия «Космонавтика, астрономия», 4. Издается ежемесячно с 1971 г.)

В настоящее время астрономы освоили почти весь спектр электромагнитного излучения — от самых длинных радиоволн до гамма-излучения, что резко раздвинуло рамки нашего знания о небесных телах, в частности о Луне и планетах Солнечной системы. В данной брошюре рассказывается о современных методах наземных исследований Луны и планет в радиодиапазоне. Приводятся результаты радиоастрономических и радиолокационных измерений физических параметров этих объектов Солнечной системы.

Брошюра рассчитана на широкий круг читателей, интересующихся современными проблемами астрономии.

20600

525 + 526

Введение

В 1609 г. великий итальянский ученый Галилео Галилей впервые направил на небо телескоп — прибор, увеличивший во много раз угловое разрешение человеческого глаза. Таким образом, этап визуальных астрономических наблюдений, в частности Луны и планет Солнечной системы, сменился следующим этапом — этапом наземных телескопических наблюдений.

Эти наблюдения вначале выполнялись лишь в оптическом (световом) диапазоне, и первые телескопы Галилея имели весьма незначительное увеличение, почти сравнимое с увеличением современного театрального бинокля. Однако и с помощью подобного инструмента на Луне удалось обнаружить горы и приблизительно оценить их высоту.

В начале XX в. возникла инфракрасная астрономия, впервые позволившая получить данные о температурах поверхностей Луны, Марса, Меркурия и о температуре надоблачной атмосферы Венеры (по измерению их излучения на длинах волн от 0,5 до нескольких микрон). В начале 1930-х годов родилась радиоастрономия, а в 1946 г. — радиолокационная астрономия. Астрономы провели большой цикл радиоастрономических и радиолокационных исследований не только ближайших к Земле небесных тел — Луны и так называемой земной группы планет: Меркурия, Марса и Венеры, но также осуществили успешные исследования более удаленных планет-гигантов: Юпитера, Сатурна, Урана, Нептуна. В последние годы начались радиолокационные

исследования спутников больших планет, а также других небесных тел Солнечной системы. Были получены отраженные сигналы от спутника Юпитера Ио, от колец Сатурна, от астероидов Икар и Торо.

Запуск в СССР 4 октября 1957 г. первого в мире искусственного спутника Земли ознаменовал собой начало нового этапа в исследовании Солнечной системы: стало возможным изучение Луны и планет как с очень близкого расстояния от этих объектов, так и непосредственно с их поверхностей. Первым результатом реализации этой возможности стал полет на Луну в 1959 г. советской автоматической станции «Луна-2». За последующий за этим полетом почти двадцатилетний период было разработано и осуществлено много научных космических проектов. Космические аппараты с научными приборами исследовали Луну, Марс, Венеру, Меркурий и Юпитер при пролете около этих небесных тел. Научные приборы были доставлены и успешно работали на поверхностях Луны, Венеры и Марса. Большой комплекс научных задач был решен с помощью приборов, установленных на борту искусственных спутников Земли, Луны, Марса и Венеры.

Освоение и исследование дальнего космоса (за пределами атмосферы и магнитосферы Земли) с помощью космических аппаратов существенно изменили отношение к исследованиям Луны и планет с Земли. Практические задачи космонавтики и космической техники (посадка космических аппаратов на поверхность, условия радиосвязи, передвижение по поверхности и т. д.) заставили повысить интенсивность наземных исследований Луны и планет, привели к росту количества наземных обсерваторий и расширению объема исследований в этих обсерваториях. С помощью наземных измерений в радио-, оптическом и ближнем инфракрасном диапазонах было получено много новой информации об атмосферах и поверхностях этих тел.

Наземные радиоастрономия и радиолокация внесли большой вклад в исследования Солнечной системы. Кратеры на Венере, период вращения Меркурия, период и направление вращения Венеры, радиационные пояса Юпитера, высокая температура поверхности Венеры, отсутствие многометрового пылевого слоя на Луне — вот далеко не полный перечень открытий, впервые

сделанных с помощью наземных радиотелескопов и радиолокаторов.

Как показывает практика космических исследований, только комбинация космических и наземных исследований позволяет наиболее полно и правильно ответить на вопросы, поставленные учеными и конструкторами космических аппаратов. Это вызвано различным характером наземных и космических измерений (в первую очередь разных расстояний до объекта наблюдений), результаты которых уточняют и дополняют друг друга. Так, например, только совокупность наземных наблюдений и исследований со спускаемых на поверхность Венеры автоматических станций позволила установить практически неизменную приповерхностную температуру атмосферы этой планеты на разных широтах и в разное время суток. Наземные радиолокационные эксперименты и инфракрасные наблюдения Марса с Земли вместе со спутниковыми спектрофотометрическими измерениями в инфракрасном и ультрафиолетовом диапазонах длин волн дали богатый материал о рельефе этой планеты. Наземная радиолокация вместе с поляризационными радиоастрономическими измерениями с борта искусственных спутников Марса позволила определить диэлектрическую проницаемость и оценить плотность вещества верхнего покрова Марса.

Все эти факты свидетельствуют о высокой эффективности совместных комплексных исследований Солнечной системы в широком диапазоне длин волн с Земли, из околопланетного пространства и непосредственно с поверхности планет.

Прогресс космонавтики и космических исследований, а также одновременное совершенствование аппаратуры и методов наземных исследований Луны и планет позволили сильно расширить наши знания об объектах Солнечной системы.

В этом комплексе исследований большая роль принадлежит радиофизическим исследованиям. Измерения с помощью радиоволн, которые проникают и сквозь облака и в глубь поверхностного слоя планет, позволяют получить данные как о температуре, плотности поверхностного слоя планет, о рельефе поверхности, так и о температурном режиме подоблачной атмосферы, а также ряд другой информации.

Методы радиоастрономических исследований Луны и планет

В радиоастрономии используется ряд физических величин и понятий, которые позволяют определить физические характеристики исследуемых объектов, в частности планет Солнечной системы. Большое значение для нашего изложения имеет понятие *интенсивности* радиоизлучения — количества энергии, проходящего в единичной полосе частот из единичного телесного угла через площадку единичного сечения в единицу времени.

Площадка единичного сечения может располагаться на любом расстоянии от источника излучения. Если интенсивность излучения относится к площадке, находящейся непосредственно на поверхности источника, то эта величина называется *яркостью* радиоизлучения. Мемой мощности радиоизлучения является величина его *потока*. В честь пионера радиоастрономии американского инженера Карла Янского единица измерения потока радиоизлучения названа его именем и составляет $1 \text{ ян} = 10^{-26} \text{ Вт} \cdot (\text{м}^2 \cdot \text{Гц})^{-1}$.

Яркость радиоизлучения I для абсолютно черного тела, как известно, связана с его температурой T законом Релея—Джинса: $I = kT/\lambda^2$, где $k = 1,38 \cdot 10^{-26}$ Дж/град — постоянная Больцмана, а λ — длина волны, на которой проводятся измерения. С помощью же радиотелескопа определяется яркость радиоизлучения исследуемого источника, который, вообще говоря, не является абсолютно черным телом. Однако используя формально в этом случае закон Релея—Джинса, мы также можем найти температуру, которую называют *радиояростной* температурой $T_{\text{я}}$. Эта радиояростная температура связана и с физической (кинетической) температурой тела, если, конечно, радиоизлучение имеет тепловую природу. При этом используется отношение радиояростной температуры к физической — так называемый *коэффициент излучения* данного тела χ , или, как его еще иногда называют, степень черноты. По величине коэффициента излучения судят о тех или иных физических характеристиках исследуемого объекта.

При исследовании радиоизлучения планет также

изучаются поляризация излучения под разными углами наблюдения, частотный спектр радиоизлучения и зависимость интенсивности излучения от времени суток и сезона. Все эти измерения проводятся в интервале от миллиметровых до декаметровых длин волн. По этим данным также определяются физические характеристики атмосферы и поверхностного слоя планеты.

За последние годы получил широкое распространение метод радиоспектроскопии, с помощью которого исследуют радиоизлучение атмосфер на частотах вблизи так называемых резонансных линий поглощения некоторых газов, входящих в состав атмосферы. Этим методом успешно исследуется распределение кислорода, водяного пара, окиси и закиси азота, озона и угарного газа в атмосферах планет. При этом измерение спектра поглощения кислорода и водяного пара позволяет определить высотные профили температуры и влажности в атмосфере.

В радиоастрономии для наблюдения далеких объектов или радиоярких близких областей малых размеров применяют радиоинтерференционные методы приема. (Этим методом исследуют, в частности, распределение радиояркости внутри галактик и квазаров.) Используя радиоинтерферометры, иногда достигают разрешения деталей (по одной координате) $0,0002''$. При этом интересно отметить, что угловое разрешение человеческого глаза всего лишь около $1'$, а теоретическое разрешение самого крупного оптического телескопа с диаметром зеркала 6 м, сооруженного на Кавказе вблизи станции Зеленчукской, составляет несколько сотых секунды дуги. Методы радиоинтерферометрии позволяют также «различать» малоразмерные, так называемые точечные объекты, на менее радиоярком фоне. При малых отличиях радиояркостей отдельных точечных деталей от общего фона небесного тела радиоинтерферометр будет воспринимать этот исследуемый объект как единое целое, хотя его угловое разрешение существенно выше, чем угловой размер этого небесного тела. Радиоинтерферометрия часто применяется в тех случаях, когда необходимо определить с высокой точностью направление на источник или угловой размер источника радиоизлучения.

С помощью радиоастрономических методов исследуют характеристики радиоизлучения среды. Радиоизлу-

чение может быть как естественным, так и искусственным. Примером последнего является фоновое радиоизлучение многочисленных радиостанций Земли, которое также может быть зафиксировано радиотелескопами, установленными на самолете или искусственном спутнике Земли. Естественное излучение планет разделяют на *тепловое* и *нетепловое*. Если небесное тело нагрето относительно окружающей среды, то интенсивность его теплового радиоизлучения будет пропорциональна разности физических (кинетических) температур этого тела и окружающей среды. При нетепловом радиоизлучении интенсивность излучения определяется уже не температурой, а либо магнитным полем и интенсивностью потоков заряженных частиц, либо какими-то другими процессами и явлениями.

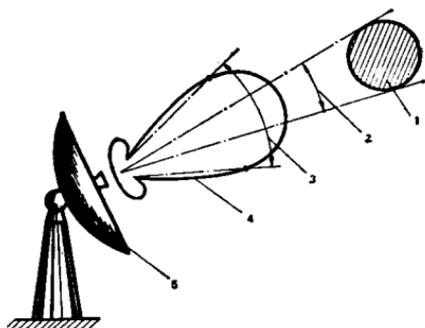
Принимаемая радиотелескопом величина мощности радиоизлучения от планеты зависит от интенсивности радиоизлучения, углового размера наблюдаемого источника, размеров антенны радиотелескопа и ряда других параметров. Определяемая по интенсивности радиоизлучения радиояркая температура зависит от физической температуры некоторого слоя, который может находиться либо на некоторой высоте над поверхностью, либо на некоторой глубине под поверхностью. Последнее определяется длиной волны излучения, химическим составом атмосферы, высотными профилями температуры и давления в атмосфере, а также электрическими свойствами вещества поверхностного слоя. Для отдельного определения кинетической температуры и коэффициента излучения обычно используют зависимость радиояркой температуры от угла наблюдения.

При проведении радиоастрономических наблюдений мощность принимаемого сигнала существенным образом зависит от размеров антенны. Если ширина диаграммы направленности антенны радиотелескопа α не превышает угла, под которым видна планета, — углового размера планеты Ω , — то мощность принимаемого радиоизлучения не будет зависеть от размеров антенны. Мощность принимаемого радиоизлучения может быть также выражена по аналогии с мощностью радиоизлучения планеты через температуру — *антенную* температуру T_A . Антенная температура зависит от радиояркой температуры планеты и фонового излучения,

принимаемого через боковые лепестки диаграммы направленности, т. е. с направлений, находящихся вне углового размера планеты. Если же ширина диаграммы направленности антенны будет существенно больше углового размера планеты, то интенсивность принятого излучения от планеты уменьшится в $(\alpha/\Omega)^2$ раз (рис. 1). Так, если радиояркостная температура плане-

Рис. 1. Измерение радиоизлучения планеты радиотелескопом, имеющим широкую диаграмму направленности по сравнению с угловым размером планеты. Наблюдаемая радиояркостная температура в $(\alpha/\Omega)^2$ раз меньше радиояркостной температуры планеты:

1 — планета; 2 — угловой размер планеты; 3 — ширина диаграммы направленности; 4 — диаграмма направленности антенны; 5 — антенна радиотелескопа



ты составляет несколько сот градусов, то антенная температура обычно равна величине порядка 1°K и менее. Например, при наблюдении Марса ($T_{\text{я}} \approx 220^\circ\text{K}$) на радиотелескопе с антенной диаметром 25 м на длине волны 1 см антенная температура радиоизлучения планеты будет около 2°K . При увеличении в 10 раз длины волны наблюдения на этом радиотелескопе пропорционально увеличится ширина его диаграммы направленности, а антенная температура уменьшится в 100 раз.

При увеличении длины волны радиоастрономических измерений (для данной антенны) величина принимаемого потока теплового радиоизлучения от планеты падает (закон Релея—Джинса). На некоторой определенной длине волны мощность принимаемого излучения достигает минимального значения, которое не может быть определено из-за собственных шумов приемного устройства радиотелескопа. В этом случае говорят, что для данного радиотелескопа при наблюдении определенной планеты достигнут верхний предел по длине волны.

При уменьшении длины волны наблюдений обычно ухудшаются чувствительность приемных устройств, а также фокусирующие свойства антенны, но увеличи-

Таблица 1

Некоторые данные о физических параметрах Луны и планет

Планета	Среднее рас- стояние от Солн- ца, 10^6 км	Средний диа- метр, 10^3 км	Угловой размер при наблюде- нии с Земли, мин/секун- ды дуги	Период враще- ния, сутки	Период обраше- ния, год	Наклонение ор- биты к плоско- сти эклиптики, градусы	Наклонение по- люсности экватора к плоскости ор- биты, градусы	Средняя плот- ность, г/см ³	Температура в полюсной точке, °С	Коэффициент отражения в видимом диапа- зоне
Меркурий	57,9	4,88	5/12	58,7	0,241	7	~ 10	5,4	+340	0,06
Венера	108,2	12,1	10/63	243	0,615	3,4	< 6	5,24	+470	0,78
Земля	149,6	12,74	—	1	1	—	23,5	5,52	+ 57***	0,36
Марс	227,9	6,79	3,5/25	1,03	1,88	1,85	25,2	3,94	+ 30	0,15
Юпитер	778,4	139,4	35/50	0,41 *	11,9	1,31	3,1	1,33	-145 **	0,76
Сатурн	1427	115,4	15/19	0,43 *	29,5	2,49	26,7	0,7	-180 **	0,69
Уран	2869	48,2	3,5/4,0	0,45	84	0,77	98	1,48	-220 **	0,86
Нептун	4569	45,7	2,3/2,5	0,66	164,8	1,77	28,8	2,06	-230 **	0,7
Плутон	5900	6,4?	—	6,4?	248,4	17,2	—	5,0?	-225?	0,14
Луна	149,6	3,48	1464/2014	27,3	0,075	5	6,67	3,34	+125	0,07

* Данные относятся к экваториальной зоне.

** Температура верхней границы облаков.

*** Максимальная температура.

вается принимаемый поток радиоизлучения. С уменьшением длины волны также изменяется (обычно уменьшается) радиояркость температура излучения планеты. Комбинация всех этих факторов приводит к тому, что для данного радиотелескопа на некоторой минимальной длине волны также достигается предел возможного измерения потока радиоизлучения планеты. Таким образом, каждый радиотелескоп имеет ограничение по диапазону рабочих волн - как сверху, так и снизу. Это ограничение различно для каждой из планет.

В табл. I даются некоторые основные характеристики планет (знак вопроса означает приближенные оценки). Малые (по сравнению с Луной) и изменяющиеся со временем угловые размеры планет приводят к определенной специфике их исследования, заключающейся в том, что большая часть измерений проводится в те моменты времени, когда планеты находятся на минимальных к Земле расстояниях, так как поток радиоизлучения, обратно пропорциональный квадрату расстояния до планеты, быстро уменьшается. Эти ограничения по времени наблюдения в еще большей степени относятся к радиолокационным измерениям, так как для них мощность облучающего сигнала на входе приемника радиолокатора уже обратно пропорциональна четвертой степени расстояния.

Наиболее полная радиоастрономическая информация получена о Луне. Этому способствовал ряд факторов: большой угловой размер Луны, при котором с помощью наземных радиотелескопов возможно исследование локальных характеристик излучения ее поверхности; возможность наблюдения при различных условиях освещения Луны Солнцем; наличие лунных затмений при быстром изменении условий освещения Луны Солнцем. Однако в чисто радиофизическом плане Луна в настоящее время представляет лишь исторический интерес. В то же время благодаря тому, что наши знания о Луне и ее свойствах достаточно обширны, сейчас радиоисследования Луны используются как своеобразный полигон для испытания новых методик радионаблюдения планет, так как наш естественный спутник по своим параметрам очень близок к планетам земной группы.

Радиолокация Луны и планет

Первая практическая реализация предсказанной Л. И. Мандельштамом и Н. Д. Папалекси еще в 1928 г. возможности радиолокации Луны и планет с Земли состоялась лишь в 1946 г., когда почти одновременно в Венгрии и США с помощью модернизированных военных радиолокаторов метрового диапазона длин волн были приняты отраженные от Луны радиосигналы. Однако первые точные измерения характеристик отражения Луны в радиодиапазоне были выполнены только в конце 50-х годов. В сантиметровом диапазоне (длины волн $\lambda=3$ и 10 см) такие измерения были выполнены впервые Горьковским научно-исследовательским радиофизическим институтом, а в метровом диапазоне — Научно-исследовательской лабораторией военно-морского флота США и обсерваторией Джодрелл-Бэнк в Англии. Коэффициент отражения радиоволн оказался очень низким и близким к коэффициенту отражения лунного грунта в оптическом диапазоне ($R=0,07$).

Радиолокационные исследования Луны с Земли были весьма интенсивными в начале 60-х годов. Они дали большой фактический материал о рельефе и свойствах верхнего покрова, что было необходимо для проектирования космических аппаратов, предназначенных для посадки на лунную поверхность, а также для проектирования радиотехнических систем, с помощью которых осуществлялась посадка и связь космического аппарата с наземным центром управления. Интенсивные исследования планет Солнечной системы начались в середине 60-х годов после постройки радиолокационных станций с большим энергетическим потенциалом.

Большой объем радиолокационных исследований был проведен с помощью планетного радиолокатора СССР ($\lambda=43$ см), радиолокатора Голдстоунского центра дальней космической связи США ($\lambda=12,5$ см), радиолокаторов лаборатории им. Линкольна Массачусетского технологического института США ($\lambda=3,8; 23$ и 68 см), радиолокаторов обсерватории Джодрелл-Бэнк Манчестерского университета в Англии ($\lambda=73$ см) и ионосферной обсерватории Корнельского университета США в Аресибо, Пуэрто-Рико ($\lambda=70$ см).

Большой вклад в радиолокационные исследования

планет внесли сотрудники Института радиотехники и электроники АН СССР (ИРЭ), где под руководством академика В. А. Котельникова был создан уникальный планетный радиолокатор СССР, с помощью которого была осуществлена радиолокация (в хронологическом порядке) Венеры, Меркурия, Марса и сделана попытка радиолокации Юпитера.

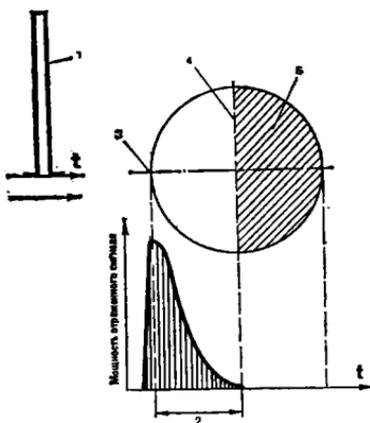
Радиолокация Луны и планет с Земли проводилась различными методами, отличающимися способом модуляции сигнала передатчика и способом обработки принимаемого сигнала. Использовались три основных метода радиолокационных исследований: импульсный метод, частотный метод и метод частотно-временного (радиолокационного) картографирования.

Импульсный метод. Суть метода заключается в том, что передатчик наземного радиолокатора работает в импульсном режиме, т. е. поверхность планеты облучается короткими импульсами с длительностью порядка 10^{-3} — 10^{-6} с. Отраженный от поверхности радиоимпульс принимается радиолокатором, после чего анализируется его амплитуда и форма.

Этот принятый отраженный радиоимпульс оказывается растянутым по длительности по сравнению с импульсом передатчика. При этом передний фронт принятого импульса формируется отраженными сигналами от области около так называемой «подрадарной» точки — точки на поверхности планеты, самой близкой к наземному наблюдателю (рис. 2). Задний фронт от-

Рис. 2. Растягивание отраженного сигнала при импульсном облучении планеты:

1 — облучающий сигнал; 2 — максимальное растягивание отраженного импульса; 3 — «подрадарная» точка; 4 — лимб планеты; 5 — невидимая сторона планеты в момент наблюдения



раженного импульса формируется за счет отражений от областей поверхности, находящихся между «подрадарной» точкой и лимбом. Длительность заднего фронта будет определяться энергетическим потенциалом радиолокатора. Если энергетический потенциал радиолокатора достаточно высок, то отраженные сигналы от областей вблизи лимба планеты будут больше уровня собственных шумов приемника, а поэтому они и могут быть зарегистрированы. Энергетический потенциал радиолокатора прямо пропорционален мощности передатчика и квадрату коэффициента усиления антенны, но обратно пропорционален уровню собственных шумов приемника.

В расчетах характеристик отражения радиоволн от планеты большую роль играет ее «радиолокационная» протяженность. «Радиолокационная» протяженность планеты представляет собой максимально возможное увеличение длительности отраженного импульса и равняется $t_0 = 2a/c$, где a — радиус планеты, а c — скорость света (для Луны $t_0 = 11,6$, а для Марса $t_0 = 22,3$ мс). Так, если к Луне посылается импульсный сигнал с длительностью 1 мс, то отраженный сигнал может иметь длительность до 12,6 мс, т. е. может быть увеличен по длительности почти в 13 раз по сравнению с посланным.

По мере распространения облучающего сигнала вдоль поверхности планеты изменяется угол падения радиоволн от $\Theta = 0$ (в «подрадарной» точке) до $\Theta = 90^\circ$ (на лимбе). При этом меняется и интенсивность отраженного сигнала, уменьшаясь от центра к лимбу в десятки, сотни, а иногда и в тысячи раз. Угол падения радиоволн для сферической поверхности планеты однозначно связан с запаздыванием радиосигнала относительно «подрадарной» точки. Разрешение по дальности, а следовательно, и разрешение по углу падения зависят от длительности импульса передатчика. (При недостаточном энергетическом потенциале радиолокатора будут регистрироваться отраженные сигналы только от районов, расположенных вблизи «подрадарной» точки).

Частотный метод. При радиолокации данным методом используется различие лучевых скоростей движения разных участков поверхности планеты относительно наземного наблюдателя. Как видно на рис. 3, участки поверхности планеты, равноотстоящие либо от оси

вращения планеты, либо от оси либрации — покачивания (в случае Луны), будут иметь одинаковые лучевые скорости. Участки поверхности, наиболее удаленные от оси вращения, будут иметь максимальные лучевые скорости, а участки поверхности, расположенные на линии «наземный наблюдатель — ось вращения планеты», будут иметь нулевую лучевую скорость. Благодаря эффекту Доплера частота отраженных сигналов от участков поверхности будет зависеть от значения их лучевых скоростей. Поэтому при облучении поверхности планеты даже монохроматическим сигналом отраженный сигнал не будет монохроматическим: он будет иметь частотный спектр, ширина которого Δf_d определяется угловой скоростью вращения планеты относительно Земли ω и длиной волны радиолокатора: $\Delta f_d = 4\omega a/\lambda$.

Если у всех планет Солнечной системы наблюдается вращение относительно Земли при их движении по орбитам вокруг Солнца, то Луна лишь немного меняет свою ориентацию относительно наземного наблюдателя. Эта смена ориентации — либрация Луны — разделяется следующим образом: 1) либрация по широте из-за наклона оси вращения Луны относительно плоскости орбиты Луны; 2) либрация по долготе из-за разной линейной скорости движения центра масс по орбите вокруг Земли; 3) суточная либрация за счет изменения направления наблюдателя, находящегося на вращающейся Земле. Угловая скорость либрации Луны изменяется в пределах $(5-10) \cdot 10^{-7}$ рад/с. Для относительно медленно вращающейся Венеры $\omega = 3 \cdot 10^{-7}$ рад/с, для Марса — $\omega = 7 \cdot 10^{-5}$ рад/с.

В частотном методе используется измерение не только амплитуды отраженного сигнала, но и формы его частотного спектра. Измерение формы спектра отраженного сигнала проводят с помощью анализатора

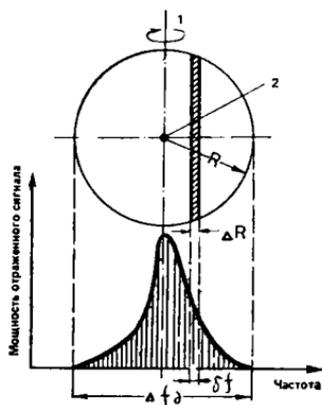


Рис. 3. Формирование «доплеровского» спектра за счет вращения планеты: 1 — ось вращения планеты; 2 — «подрадарная» точка

спектра. Этот прибор имеет конечное разрешение по частоте, определяемое полосой пропускания элементарного частотного фильтра: интенсивность отраженного сигнала на выходе каждого частотного фильтра анализатора будет определяться отраженными сигналами, полученными от некоторой полоски на поверхности планеты (в ее картинной плоскости), параллельной оси вращения и имеющей ширину, пропорциональную полосе пропускания этого фильтра.

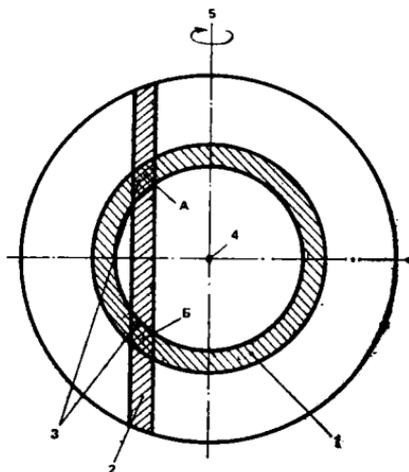
Для получения большого разрешения по поверхности следует иметь большое разрешение по спектру. Предельное значение возможного разрешения по частоте анализатора спектра определяется стабильностью частоты передатчика, стабильностью гетеродинов приемника, стабильностью амплитудно-частотных характеристик анализатора спектра и т. д. Однако реализация анализа предельно узкой полосы частотного спектра, а следовательно, и получение предельно подробных спектров отраженного сигнала не всегда возможны, так как при сужении полосы пропускания уменьшается и энергия отраженного сигнала.

Метод радиолокационного картографирования. Метод радиолокационного или частотно-временного картографирования соединяет в себе принципы двух предыдущих методов. Проведение спектрального анализа отраженного импульса при импульсной модуляции передатчика позволяет получить элементарный отраженный сигнал, который соответствует определенному доплеровскому смещению частоты для выбранного запаздывания относительно отражения от «подрадарной» точки. Как видно из рис. 4, разрешение по дальности радиолокатора определяет ширину кольцевой зоны, а разрешение по частоте анализатора спектра — ширину полоски, параллельной оси вращения планеты. Два симметричных участка (*A* и *B* на рис. 4) будут иметь одинаковое запаздывание и одинаковую доплеровскую частоту — неоднозначность «верх—низ» на рис. 4. Для разрешения такой неоднозначности, т. е. для получения отдельных отраженных сигналов от этих участков, необходимо иметь антенну радиолокатора с диаграммой направленности, по крайней мере в 2 раза меньшей углового размера планеты.

Впервые радиолокационное картографирование было выполнено для Луны в 1961 г. на радиолокаторе ла-

боратории им. Линкольна Массачусетского технологического института в США. Однако в этой работе не была устранена неоднозначность «верх—низ», т. е. было получено совмещенное радиолокационное изображение южной и северной части диска планеты. Позднее в той же лаборатории на длине волны 3,8 см и в ионосферной

Рис. 4. Частотно-временная селекция и отождествление участков на поверхности: 1 — кольцевая зона, выделяемая селекцией по времени; 2 — зона, выделяемая селекцией по частоте Доплера; 3 — области, выделяемые сочетанием двух типов селекций; 4 — «подрадарная» точка; 5 — ось вращения планеты



обсерватории в Аресибо ($\lambda=70$ см) были получены карты отражательной способности Луны с высоким разрешением. Методом радиолокационного картографирования в последнее время в лаборатории реактивного движения Калифорнийского технологического института была получена карта поверхности Венеры с разрешением по поверхности 10 км на длине волны 12,5 см (для приэкваториальной области диаметром 1500 км).

Существует и несколько видоизмененный метод частотно-временного картографирования, в котором измеряется только «доплеровский» спектор. В этих измерениях данные о запаздывании получаются вследствие смещения ориентации мгновенной оси вращения планеты относительно наземного наблюдателя. Этот метод был использован при картографировании Луны на длине волны $\lambda=23$ см.

Характеристики отражения. Одной из важнейших характеристик отражения радиоволн от поверхности планеты является диаграмма обратного рассеяния — зависимость интенсивности отраженного сигнала от

угла падения. Она несет в себе информацию о рельефе поверхности (а по энергии отраженного сигнала судят о коэффициенте отражения радиоволн). Коэффициент отражения, в свою очередь, зависит от таких параметров верхнего покрова планеты, как эффективная диэлектрическая проницаемость и плотность.

Если бы поверхность планеты была равномерно яркая, как это имеет место для Луны в оптическом диапазоне, то ее диаграмма обратного рассеяния определялась бы законом Ломмеля—Зеелигера $V(\Theta) = \cos \Theta$ (здесь Θ — угол падения). Для поверхности, отражающие свойства которой не зависят от угла наблюдения — диффузно-рассеивающей сферы, реализуется закон Ламберта $V(\Theta) = \cos^2 \Theta$. Однако все диаграммы обратного рассеяния Луны и планет в радиодиапазоне более узкие, чем вышеперечисленные.

В связи с существенно меньшими требованиями к энергетическому потенциалу радиолокаторов Луны (меньшие требуемые мощность передатчика и чувствительности приемника, более широкие диаграммы направленности вследствие меньших геометрических размеров антенн) наш естественный спутник был исследован более подробно (и раньше по времени), чем планеты. Причем большая часть исследований Луны была выполнена импульсным методом. Анализ диаграмм обратного рассеяния Луны показал, что интенсивность отраженного сигнала быстро падает с ростом угла падения Θ (при малых его значениях). Затем при больших Θ происходит более медленное уменьшение интенсивности отраженного сигнала; причем область углов падения, где начинается более медленное изменение интенсивности отраженного сигнала, зависит от длины волны радиолокатора. Чем больше длина волны, тем более узкий пик диаграммы обратного рассеяния при малых значениях Θ .

Разный характер формы диаграммы обратного рассеяния в области малых и больших углов падения был интерпретирован Т. Хэгфорсом и П. Бэкманом (США) за счет разных механизмов переизлучения. Ими также было показано, что узкий пик этой диаграммы определяется отражением от крупномасштабных и относительно плоских площадок, которые наклонены относительно средней сферической поверхности планеты. В то же время отраженный сигнал при больших углах падения

получается в основном за счет рассеяния радиоволн мелкими по сравнению с длиной волны неоднородностями, характерные размеры которых меньше λ . Такими неоднородностями являются, например, ямы, камни и валуны на поверхности. Так как распределение и размеры больших и малых неоднородностей на поверхности являются случайными, то теории отражения радиоволн, разработанные вначале применительно к Луне, базировались в основном на статистических закономерностях. Большой вклад в развитие теории отражения радиоволн от статистически неровных поверхностей внес академик Л. М. Бреховских.

Форма спектра отраженного сигнала от планеты, получаемого с помощью частотного метода, однозначно связана с формой диаграммы обратного рассеяния планеты, определяемой импульсным методом. Поэтому при исследовании характеристик отражения радиоволн от поверхности всей планеты частотный и импульсный методы равнозначны. Однако реализация частотного метода требует (при одном и том же энергетическом потенциале) меньшей мощности передатчика. Поэтому частотный метод чаще используется при исследовании планет.

Радиотелескопы и радиолокаторы

Современный радиотелескоп является весьма сложным устройством, состоящим в основном из следующих главных элементов: антенны, системы перемещения антенны в вертикальной и горизонтальной плоскостях, приемного устройства, устройства предварительной обработки принятого сигнала, устройства управления антенной. Планетный радиолокатор в дополнение к вышеупомянутым элементам имеет еще передающее и модуляционное устройства, а также систему синхронизации.

Планетные радиолокаторы с отключенными передатчиками обычно используются в качестве радиотелескопов для наблюдения радиоизлучения планет и других небесных тел. При этом приемное устройство радиолокатора либо переключается из режима узкополосного приема в режим широкополосного приема, либо на телескопе устанавливается специальный радиоастрономический приемник — радиометр.

Рассмотрим основные устройства радиотелескопов и планетных радиолокаторов (рис. 5).

Антенны. Одним из наиболее сложных устройств современного радиотелескопа и планетного радиолокатора является антенная система. Антенна собирает энергию радиоизлучения от небесного источника и передает



Рис. 5. Блок-схема радиотелескопа. Дополнительные блоки планетного радиолокатора показаны пунктиром

ее приемному устройству. Чем больше линейные размеры антенны, тем большая величина энергии радиоизлучения собирается антенной. С ростом линейных размеров антенны сужается ее диаграмма направленности, т. е. уменьшается угол, в пределах которого антенна эффективно принимает радиоизлучение. А тем самым увеличивается разрешающая способность антенны по углу и возрастает ее коэффициент усиления. Поэтому радиоастрономы стремятся создавать для исследования источников радиоизлучения, имеющих малые угловые размеры, антенны возможно больших размеров.

Радиоастрономические антенны можно разделить по аналогии с оптическими телескопами на две группы — радиорефлекторы (одионочные антенны) и радиорефракторы (многоэлементные антенны). В радиорефлекторах поток радиоизлучения собирается и фокусируется «зеркальной» системой. Сфокусированный сигнал поступает на облучатель и через фидерный тракт, соединяющий антенну с приемным устройством, передается в приемное устройство. В радиорефракторах поток радиоизлучения принимается отдельными антеннами и складывается затем в фидерном тракте.

В радиоастрономии применяются следующие типы рефлекторных антенн: параболические, сферические,

Таблица 2

Основные характеристики антенн некоторых отечественных и зарубежных радиотелескопов

№ п.п.	Обсерватория. Телескоп	Расположение	Размер антенны, м	Минимальная длина волны, см	Тип антенны	Зона обзора
1	Крымская астрофизическая обсерватория АН СССР. РТ-22	Симеиз, Крымская обл. СССР	22	0,4	Зеркальная параболическая	Полноворотная антенна
2	Физический институт АН СССР. РТ-22	г. Пушино. Моск. обл. СССР	22	0,6	То же	То же
3	Национальная радиоастрономическая обсерватория (НРАО) США	Китт-Пик. Штат Аризона. США	11	0,13		
4	Австралийская национальная радиоастрономическая обсерватория	Паркс. Австралия	64	4		
5	Институт им. М. Планка (ФРГ)	Эффельсберг. ФРГ	100	1,2		
6	Национальная радиоастрономическая обсерватория (НРАО) США	Грин-Бэнк. Штат Западная Вирджиния. США	42	1,8		
7	Джодрелл Бэнк MARK-II (Великобритания)	Маклесфилд. гр. Чeshire. Англия	40×24	13		
8	Научно-исследовательский радиозинический институт. РТ-25×2	Горький. СССР	25×2	0,13	Зеркальная. Неподвижный параболический отражатель	Меридиональная

1	2	3	4	5	6	7
9	Медонская астрофизическая обсерватория	Нанси. Франция	305×35	6	Зеркальная. Неподвижный сферический и наклоняемый плоский отражатель	Меридиональная
10	Специальная астрофизическая обсерватория АН СССР. РАТАН-600	Станица Зеленчукская. Кавказ. СССР	Кольцо диаметром 588 м. 895 отражателей $2 \times 7,4$ м 120×3	0,8	Зеркальная. Переменного профиля	$\Theta = \pm 20^\circ$ (вся поверхность) $\Theta = \pm 90^\circ$ (сектор $\leq 180^\circ$)
11	Главная астрономическая обсерватория АН СССР, БПР	Пулково. Ленинград. СССР		0,8		Меридиональная
12	Институт радиофизики и электроники АН УССР. УТР-2	Харьков. СССР	В—3:900 м С—Ю:1800 м	1250	Т-образная. Синфазная	»
13	Физический институт АН СССР. ДКР-1000	г. Пушкино. Моск. обл. СССР	2 антенны 1000×40 м	250	решетка Крестообразная решетка. Парabolicный цилиндр	
14.	Национальная радиоастрономическая обсерватория (НАРАО) США	Грин-Банк. Штат Западная Вирджиния. США	91,5	20	Зеркальная лараболлическая	

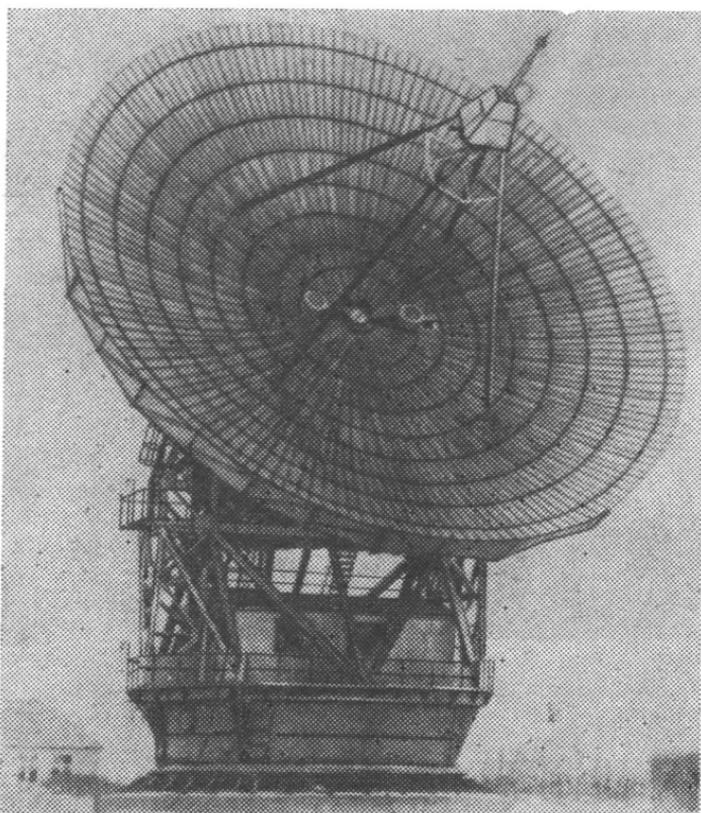


Рис. 6. Радиотелескоп РТ-22 Физического института АН СССР
в г. Пушино

рупорные, перископические, переменного профиля. К рефракторным антеннам относятся различные типы интерферометрических систем, синфазные антенны, фазуемые решетки и крестообразные антенны. Основные характеристики антенн некоторых советских и зарубежных телескопов приведены в табл. 2.

Параболические антенны. Наиболее широкое применение среди рефлекторных антенн нашли параболические. Эти антенны имеют свой аналог в оптике — прожектор с параболическим отражателем, в котором свет от «точечного» источника превращается в параллельный лучок. В параболической антенне процесс идет в обратном направлении — параллельный поток радиониз-

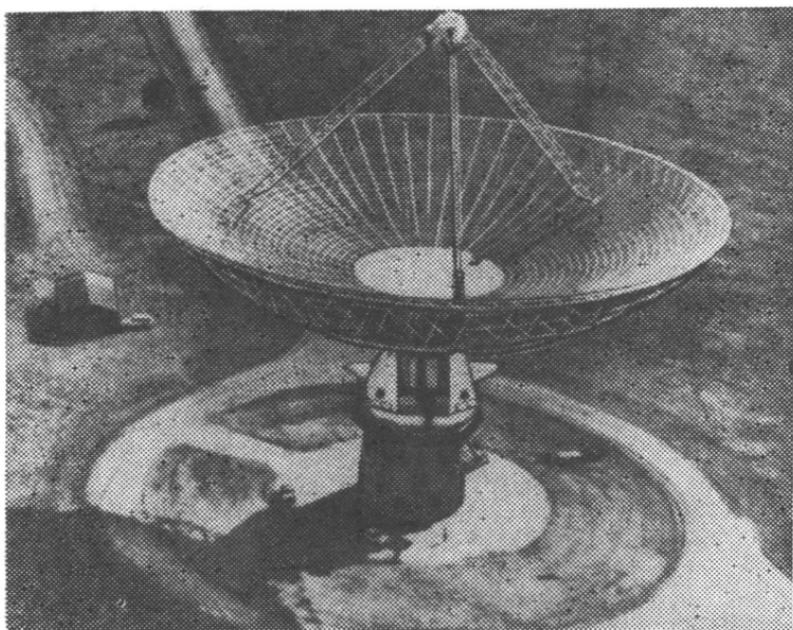


Рис. 7. Полноповоротная антенна радиотелескопа диаметром 64 м (Австралийская национальная радиоастрономическая обсерватория в Парксе)

лучения фокусируется зеркалом в фокусе параболоида, где он принимается облучателем.

Параболические антенны, используемые в радиоастрономии, имеют внушительные размеры (рис. 6 и 7). Самый большой на Земле полноповоротный параболический радиотелескоп имеет зеркало диаметром 100 м. Его антенна поворачивается на 360° по азимуту и 90° по углу места. Вес антенного сооружения составляет 3200 т.

Параболические антенны могут работать только в ограниченном диапазоне длин волн: выполнить параболическую поверхность абсолютно точно невозможно, вследствие чего неровности поверхности параболоида при работе на очень коротких длинах волн начинают ухудшать фокусирующие свойства антенны. Это приводит, в свою очередь, к ухудшению эффективности антенны, т. е. как бы уменьшению площади раскрыва антенны, собирающей поток радиоизлучения. А так как

с ростом длины волны расширяется диаграмма направленности антенны и на некоторой длине волны данную антенну становится уже нецелесообразно использовать для наблюдений (так как при этом уменьшается ее коэффициент усиления), то радиоастрономы для более длинноволновых измерений используют другие типы антенн.

Однако даже в одинаковых конструкциях параболических антенн минимальная длина волны, на которой еще эффективно работает антенна, может быть разной. Это зависит от тщательности изготовления поверхности зеркала и от деформаций зеркала при изменении его ориентации в пространстве, а также от действия тепловых и ветровых нагрузок. Так, например, зеркало диаметром 22 м антенны РТ-22 Крымской астрофизической обсерватории по своему исполнению более точное, чем зеркало антенны аналогичных размеров в Пушино (Физический институт АН СССР).

Параболические антенны, работающие в миллиметровом диапазоне длин волн, имеют диаметр, не превышающий 25 м. Антенны больших размеров эффективно работают в сантиметровом диапазоне. Антенна РТ-22 Крымской астрофизической обсерватории может эффективно работать на длинах волн не короче 4 мм. Антенна Национальной радиоастрономической обсерватории США с диаметром 11 м, установленная на горе Китт-Пик, работает с предельной длиной волны 1,2 мм. Для уменьшения температурных деформаций зеркала антенна этого радиотелескопа в нерабочем состоянии находится под куполом диаметром 30 м (во время измерений купол частично раскрывается).

Сферические антенны. На земном шаре существует всего несколько радиоастрономических антенн, имеющих сферическое зеркало. Эти антенны получили также название «земляные чаши», так как сферический отражатель в них находится на поверхности Земли, а смещение диаграммы направленности антенны производится за счет перемещения облучателя. Самая большая антенна такого типа (с диаметром раскрытия 305 м) находится на о. Пуэрто-Рико в Южной Америке (обсерватория Аресибо).

Антенны со сферическими зеркалами менее эффективно фокусируют электромагнитное излучение, чем параболические антенны, но обладают тем преимущест-

вом, что могут осуществлять обзор (сканирование) неба в пределах большего телесного угла (без поворота самого зеркала, а только за счет смещения отражателя из фокуса зеркала). Так антенна в Аресибо позволяет смещать диаграмму направленности в пределах 20° относительно зенита в любом направлении. Ее зеркало состоит из металлических щитов, которыми выстлано дно потухшего вулкана. На трех гигантских опорах натянуты тросы, по которым движется специальная каретка с установленными на ней облучателями и другой радиотехнической аппаратурой (см. первую страницу обложки). Антенна может эффективно работать до длины волны не короче 10 см (на этой волне ее диаграмма направленности имеет ширину $1,5'$). Антенна в Аресибо до реконструкции имела сферическую поверхность из металлической сетки и могла эффективно работать только в длинноволновом участке дециметрового диапазона ($\lambda \geq 50$ см). Аресибская антенна также используется в качестве антенны планетного радиолокатора, работающего на длине волны 12,5 см и имеющего среднюю мощность 450 кВт.

В Бюраканской астрофизической обсерватории работает самая коротковолновая сферическая антенна с неподвижным зеркалом, диаметр которого равен 5 м. Антенна является прообразом будущей, проектируемой для Бюраканской обсерватории 200-метровой чаши, которая по расчетам будет иметь предельную длину волны 3 см.

Рупорные антенны. В отличие от зеркальных (сферических и параболических) рупорные антенны состоят из одного облучателя. Радиоастрономических антенн такого типа на Земле немного. Благодаря тому что их характеристики можно точно рассчитать, эти антенны используются для прецизионных измерений потоков радиоизлучения некоторых источников, которые радиоастрономами принимаются за эталонные. С помощью рупорной антенны был точно измерен поток радиоизлучения источника Кассиопея А и открыто реликтовое радиоизлучение. Туманность Кассиопея А является одним из самых мощных источников радиоизлучения и широко используется радиоастрономами для калибровок антенн в качестве эталонного источника.

Перископические антенны. В радиоастрономии нашли широкое применение и перископические антенны,

преимуществом которых является то, что при относительно больших размерах они обладают довольно хорошей эффективностью. Антенны подобного типа состоят из трех элементов: плоского зеркала, которое поворачивается по углу места; фокусирующего главного зеркала (в виде сферического или параболического цилиндра) и облучателя.

Сферическое или параболическое зеркало фокусирует поток радиоизлучения в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Так как линейные размеры таких антенн в горизонтальном направлении существенно больше, чем в вертикальном, то и ширина диаграммы направленности антенн в горизонтальной плоскости существенно меньше ширины диаграммы, чем в вертикальной плоскости. Самая коротковолновая перископическая антенна сооружена в обсерватории Горьковского радиофизического института. Она эффективно работает до длин волн 1 мм. На длине волны 4 мм ширина диаграммы направленности этой антенны составляет 45" в горизонтальной плоскости и 8' в вертикальной плоскости.

Антенны переменного профиля. Вблизи станции Зеленчукской Ставропольского края начал работать радиотелескоп РАТАН-600 (рис. 8). Схема его антенной системы напоминает схему перископической антенны.

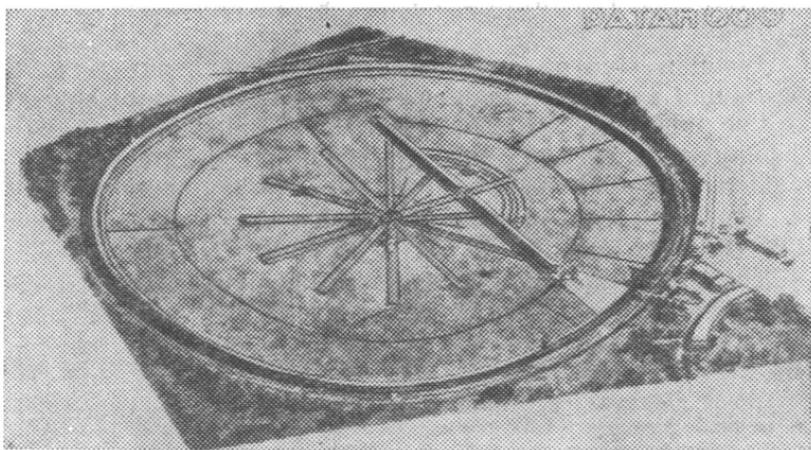


Рис. 8. Макет радиотелескопа РАТАН-600. Специальная Астрофизическая обсерватория АН СССР, Краснодарский край

Однако в отличие от последней главное зеркало этой антенны в вертикальной плоскости плоское. Несмотря на гигантские размеры (диаметр главного зеркала 588 м), эта антенна может эффективно работать до длины волны 8 мм.

Рассмотрим теперь различные типы рефракторных антенн, которые эффективно используются на метровых волнах.

Синфазные антенны. Эти антенны состоят из отдельных полуволновых облучателей (диполей), которые составляют полотно, имеющее n облучателей в одном направлении и m облучателей в ортогональном направлении. Расстояние между облучателем в обоих ортогональных направлениях равно половине длины волны. С помощью антенны подобного типа, состоящей из 64 диполей, была проведена первая радиолокация Луны на длине волны 2,5 м.

В синфазных антеннах суммирование сигналов от отдельных облучателей производится в фидерном тракте. Причем вначале суммируются сигналы от облучателей, расположенных в одном ряду, а затем уже производится суммирование по этажам (или наоборот). Чем больше число облучателей в ряду, тем уже диаграмма направленности антенны в плоскости, проходящей вдоль ряда этих диполей. Синфазные антенны узкополосны, т. е. практически они могут работать только на одной длине волны.

Антенна Центра дальней космической связи СССР, состоящая из 8 параболических антенн, расположенных по 4 в ряд (рис. 9), имеет почти в 8 раз больший коэффициент усиления, чем коэффициент усиления отдельной параболической антенны. Эта сложная антенна построена по принципу синфазной антенной решетки¹.

Крестообразные антенны. Дальнейшим развитием антенн подобного типа явились крестообразные антенны. В них используется не $n \times m$ облучателей, как в

¹ Если в высокочастотном тракте, «запитывающем» облучатели, менять фазовые соотношения по высокой частоте с помощью управляемых фазовращателей, то появляется возможность изменения направления максимума диаграммы направленности антенны. Этот принцип нашел применение в антеннах, называемых *фазирруемыми решетками*.

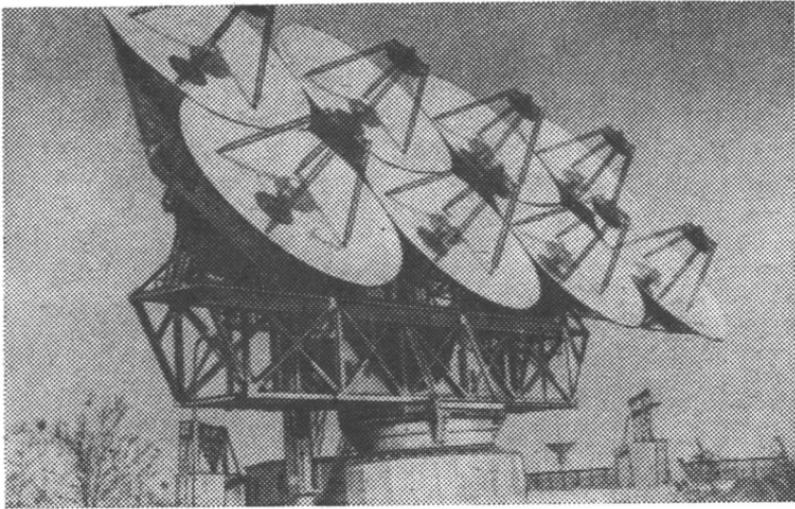


Рис. 9. Антенна Центра дальней космической связи СССР

синфазных антеннах, а $n+t$ облучателей. В этих антеннах n облучателей располагается в одном направлении, а t облучателей в направлении, перпендикулярном к нему. Путем соответствующего фазирования по высокой частоте такая антенна имеет диаграмму направленности (в вышеуказанных плоскостях), подобную диаграмме антенны, состоящей из $n \times t$ облучателей. Однако коэффициент усиления такой крестообразной антенны меньше, чем у соответствующих синфазных антенн (состоящих из $n \times t$ облучателей). Часто такие антенны называют антеннами с незаполненной апертурой (раскрывом). (В синфазных антеннах, или антеннах с заполненной апертурой ($n \times t$ облучателей), для изменения направления диаграммы направленности в пространстве необходимо поворачивать плоскость расположения облучателей путем поворота подвижного основания.)

В фазируемых решетках и антеннах с незаполненной апертурой обычно изменение направления диаграммы направленности в одной из плоскостей осуществляется за счет изменения фазовых соотношений в фидерном тракте, а в другой плоскости — за счет механического поворота антенной системы.

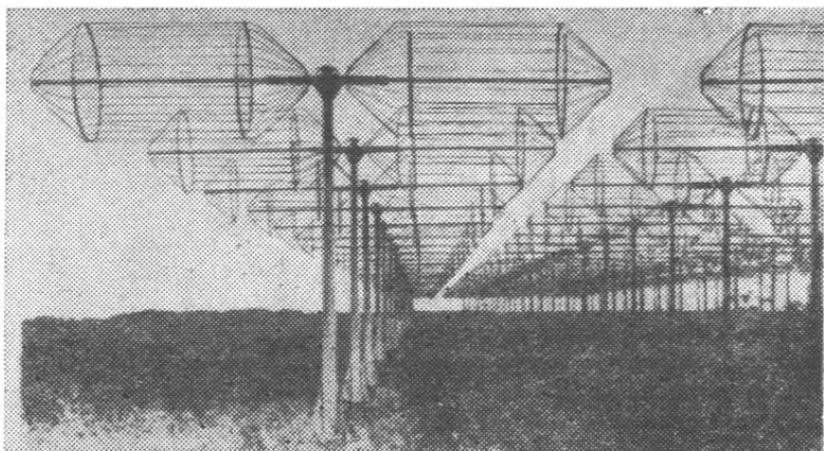


Рис. 10. Антенна радиотелескопа декаметрового диапазона УТР-2 Харьковского института радиотехники и электроники АН УССР

Крупнейшей антенной крестообразного типа в декаметровом диапазоне является антенна радиотелескопа УТР-2 Харьковского института радиотехники и электроники (рис. 10). Эта антенная система состоит из 2040 широкополосных неподвижных облучателей, расположенных параллельно земной поверхности и образующих два плеча — «север—юг» и «запад—восток».

Интерферометры. Особое место среди антенных систем занимают антенные интерферометры. Простейший радиоинтерферометр состоит из двух антенн, соединенных высокочастотным кабелем; сигналы от них суммируются и поступают на приемное устройство. Как и в оптическом интерферометре, разность фаз принятых сигналов определяется разностью хода лучей, которая зависит от расстояния между антеннами и направления прихода радиосигналов (рис. 11).

Из-за движения источника радиоизлучения по небесной сфере как раз и происходит изменение разности фаз сигналов, принятых антеннами радиоинтерферометра. Это приводит к появлению максимумов и минимумов интерференционных сигналов. Перемещение источника радиоизлучения на некоторый угол, при котором максимум интерференционного сигнала в радиоинтерферометре сменит минимум, эквивалентен ширине его

диаграммы направленности. Однако в отличие от одиночных антенн радиоинтерферометр имеет многолепестковую диаграмму направленности в плоскости, проходящей вдоль базы интерферометра. Ширина интерференционного лепестка тем уже, чем больше расстояние (база) между антеннами. (В плоскости, ортогональной

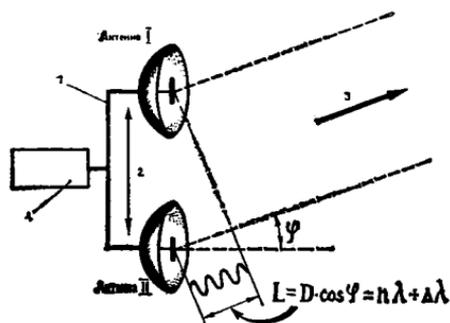


Рис. 11. Схема двух-антенного радиоинтерферометра: 1 — высокочастотный кабель; 2 — база интерферометра; 3 — направление на источник радионизлучения; 4 — приемное устройство

базе интерферометра, диаграмма направленности определяется размерами одиночной антенны этого интерферометра.)

В настоящее время создание высокостабильных генераторов частоты позволило реализовать радиоинтерферометрию с независимым приемом. В этой системе высокочастотные сигналы принимаются каждой из двух антенн и независимо друг от друга преобразуются в более низкие частоты с помощью сигналов от высокостабильных атомных стандартов частоты.

Интерферометры с независимым приемом в настоящее время работают с базами, превышающими размер континента и достигающими 10 000 км. Угловое разрешение таких интерферометров достигло нескольких десятитысячных долей секунды дуги.

Приемники. Одной из основных характеристик радиотелескопа и планетного радиолокатора является чувствительность — минимальная мощность принятого сигнала, которую может зарегистрировать радиотелескоп или радиолокатор. Чувствительность зависит от параметров приемного устройства, параметров антенн и характеристик окружающего антенну пространства. В радиоастрономии принимаются настолько слабые сигналы радионизлучения, что для того чтобы зарегист-

ризовать эти сигналы, их приходится усиливать во много раз; при этом и полезные сигналы и помехи имеют шумовой характер. Это осложняет их разделение в приемном устройстве.

Приемные устройства радиотелескопов — радиометры, имея высокую чувствительность, также обладают высокой стабильностью своих характеристик. Так как чувствительность приемника главным образом определяется характеристиками его высокочастотной части, то поэтому входным узлам радиометра уделяют повышенное внимание. Для снижения уровня шумов приемника в его входных устройствах используются «малошумящие» высокочастотные усилители на лампах бегущей волны или туннельных диодах, а также применяются параметрические или квантовые парамагнитные усилители. Для получения еще более высокой чувствительности приемника его высокочастотные узлы охлаждают до сверхнизких температур (в качестве хладагентов используют жидкий азот или жидкий гелий). Система охлаждения, использующая жидкий гелий, позволяет получить температуру высокочастотных узлов приемника $5-10^{\circ}\text{K}$.

Радиоастрономические приемники для обеспечения высокой чувствительности должны иметь полосы пропускания в сотни мегагерц или даже несколько тысяч мегагерц. Однако приемники со столь широкими полосами пригодны не для всех исследований. Так, измерение в радиодиапазоне спектров поглощения некоторых газов, находящихся в атмосферах Земли и планет (водяного пара, кислорода, озона и т. д.), требует максимальных полос пропускания порядка 50 МГц. Чувствительность такого приемника будет относительно невысокой. Поэтому в таких измерениях необходимую чувствительность получают за счет увеличения времени накопления сигнала на выходе радиометра.

Допустимое время накопления сигнала определяется схемой измерения и временем наличия сигналов радиоизлучения исследуемого небесного тела в поле зрения антенны радиотелескопа. При малых временах накопления (интегрирования), исчисляемых секундами или десятками секунд, оно обычно осуществляется на элементах выходных фильтров радиометра. При больших временах накопления функции интегратора выполняет ЭВМ.

Все вышеописанные методы позволяют понизить уровень собственных шумов в сотни и тысячи раз. При этом радиометр может измерять интенсивность радиоизлучения, соответствующую шумовой температуре $0,003—0,01^{\circ}\text{К}$ (при времени накопления 1 с). Однако собственными шумами обладает не только приемное устройство, но и антенно-фидерная система, шумы которой зависят от многих параметров: температуры, коэффициента полезного действия антенны, потерь электромагнитной энергии в фидерном тракте и т. д.

В радиоастрономии интенсивность шумовых сигналов принято характеризовать шумовой температурой. Этот параметр определяется мощностью шумов в полосе пропускания, равной 1 Гц. Чем выше к. п. д. антенны, тем ниже ее шумовая температура, а следовательно, тем выше может быть получена чувствительность радиотелескопа.

Помехи радиоприему. Повышение чувствительности радиотелескопов ограничивается внешними помехами естественного происхождения. Искусственные помехи в значительной степени уменьшены за счет выбора специально для радиоастрономических исследований частотных диапазонов, в которых запрещена работа наземных и космических радиостанций и радиосистем любого назначения. Для уменьшения влияния промышленных помех радиотелескопы располагают вдали от промышленных центров, преимущественно в котлованах гор, так как последние хорошо экранируют радиотелескопы от наземных промышленных помех.

Естественными помехами являются радиоизлучения земной поверхности и атмосферы, а также самого космического пространства. Для снижения влияния фонового радиоизлучения Земли на показания радиометра антенну радиотелескопа конструируют таким образом, чтобы ее диаграмма направленности в направлении к поверхности Земли имела значительное ослабление по сравнению с направлением на исследуемое небесное тело.

Благодаря наличию в земной атмосфере газов, имеющих линии молекулярного поглощения в радиодиапазоне (кислород, водяной пар, озон, угарный газ и т. д.), атмосфера излучает шумовые сигналы в миллиметровом и сантиметровом диапазонах и также ослабляет в этих диапазонах принимаемое радиоизлучение небес-

ных тел. Интенсивность радиоизлучения атмосферы существенно зависит от длины волны — сильно возрастает с уменьшением длины волны. Радиоизлучение атмосферы особенно сильно вблизи резонансных линий упомянутых газов (наиболее интенсивными линиями являются линии кислорода и водяного пара вблизи длин волн 1,63; 2,5; 5 и 13,5 мм).

Для уменьшения влияния атмосферы радиоастрономы выбирают для наблюдений небесных тел участки радиодиапазона вдали от резонансных линий. Эти участки, в которых атмосферные шумы минимальны, получили название «окон прозрачности» атмосферы. В миллиметровом диапазоне такими «окнами» являются участки вблизи длин волн 1,2; 2,1; 3,2 и 8,6 мм. Чем в более коротковолновом диапазоне находится «окно прозрачности», тем большее в нем ослабление радиосигнала от исследуемого источника и выше уровень шумов атмосферы. (Радиоизлучение атмосферы сильно возрастает с ростом влажности. Основная масса водяного пара находится в приземном слое атмосферы на высотах до 2—3 км.)

Для уменьшения влияния атмосферы на радиоастрономические измерения радиотелескопы стараются размещать в районах с очень сухим климатом и на больших высотах над уровнем моря. Таким образом, требования к размещению радиотелескопов во многом оказываются схожими с требованиями размещения оптических телескопов. Поэтому часто в высокогорных обсерваториях вместе с радиотелескопами размещаются и оптические телескопы.

На результаты наблюдения космического радиоизлучения оказывает также влияние влага, сконцентрированная в облаках и выпадающая в виде осадков. Шумы атмосферы за счет этих компонент существенно возрастают с уменьшением длины волны (на волнах короче 3—5 см). Поэтому радиоастрономы стараются провести измерения в безоблачную погоду.

Кроме радиоизлучения атмосферы и поверхности Земли, фактором, ограничивающим чувствительность радиотелескопа, является космическое излучение Галактики и Метагалактики. В дециметровом, сантиметровом и миллиметровом диапазонах длин волн Метагалактика излучает подобно абсолютно черному телу, нагретому до температуры 2,7° К. Это излучение распре-

делено в пространстве изотропно. Интенсивность же излучения межзвездной среды в Галактике зависит от направления наблюдения (особенно велика интенсивность излучения в направлении Млечного Пути). Излучение галактического происхождения возрастает также с увеличением длины волны на волнах более 30 см. Поэтому наблюдение радиоизлучения небесных тел на волнах длиннее 50 см является весьма сложной задачей, которая усугубляется также возрастающим влиянием земной ионосферы на волнах метрового диапазона.

Передатчики. Для измерений характеристик отражения планет средняя мощность передатчиков планетных радиолокаторов должна составлять сотни киловатт. В настоящее время создано всего несколько таких радиолокаторов.

Передатчики планетных радиолокаторов работают либо без модуляции, либо используют какой-либо вид модуляции. Выбор режима излучения передатчика зависит от задач исследований. Так, измерение эффективной площади рассеяния и «доплеровского» спектра сигнала, отраженного от планеты, не требует модуляции и обычно проводится при монохроматическом излучаемом сигнале. В то же время измерение дальности до планеты и радиолокационное картографирование требуют модулированного сигнала.

Импульсная модуляция передатчика (применяемая при исследовании Луны) не может обеспечить большую среднюю мощность излучения, и поэтому она практически не используется при планетных исследованиях. Методы частотной и фазовой модуляции применяются почти во всех передатчиках крупнейших планетных радиолокаторов. Так, планетный радиолокатор центра дальней космической связи СССР для измерения дальности использует метод линейной частотной модуляции, а планетный радиолокатор Массачусетского технологического института — метод «псевдощумовой фазовой манипуляции».

Передатчики планетных радиолокаторов должны иметь весьма высокую стабильность частоты излучения (относительная нестабильность передатчика должна быть порядка 10^{-9}). Поэтому они строятся по схеме: стабилизированный маломощный генератор + усилитель мощности.

Основные характеристики передатчиков, используемых в зарубежных планетных радиолокаторах, а также отдельные характеристики этих радиолокаторов приведены в табл. 3 (см. с. 38).

Устройства наведения антенн и обработки принятых сигналов. Современный радиотелескоп немалым без ЭВМ. Обычно в нем применяются даже две ЭВМ. Одна из них работает в контуре наведения и сопровождения исследуемого источника излучения. Она вырабатывает сигналы, пропорциональные текущему азимуту и углу места источника, которые затем поступают в блоки управления приводами антенны. Эта же ЭВМ также контролирует правильность исполнения приводами антенн управляющих команд, анализируя сигналы с датчиков углов поворота этих приводов.

Антенные системы радиотелескопов могут изменять положение диаграммы направленности как в одной, так и в двух плоскостях. Обычно изменение положения диаграммы направленности антенн производится путем механического перемещения антенны или облучателя в соответствующей плоскости. (Исключение составляют антенны типа фазуемых решеток, в которых изменение направления приема радиоизлучения осуществляется путем изменения фазовых соотношений в фидерном тракте.)

Антенны с одной степенью свободы обычно устанавливаются вдоль меридиана и изменяют свое положение по углу места, а измерение радиоизлучения источника производится во время прохождения его через географический меридиан, на котором расположен радиотелескоп. По такому принципу работает большое количество радиотелескопов. Полноповоротными антеннами обычно являются антенны зеркального типа.

Кроме обычно принятой азимут-угломестной системы наведения, в некоторых радиотелескопах используется экваториальная система, в которой антенна радиотелескопа может поворачиваться относительно оси, параллельной оси вращения Земли (вдоль параллели), а также и в ортогональной плоскости. Такая система наведения антенны требует более простых алгоритмов для управления положением диаграммы направленности в пространстве.

Системы управления антенной, кроме наведения и

Таблица 3

Основные характеристики передатчиков и радиолокаторов
некоторых зарубежных стран

Обсерватория	Расположение	Размер антенны, м	Рабочая длина волны, см	Мощность передатчика		Тип антенны	Зона эбора
				тепловая, кВт	импульсная, кВт		
Лаборатория им. Линкольна, Массачусетский технологический институт	Хайстек-Хилл, Вестфорд, Шт. Массачусетс. США	36,6	3,8	300	300	Параболическая	Полноворотная
Лаборатория реактивного движения, Калифорнийский технологический институт	Голдстон, Шт. Калифорния, США	64 26	12,5	450	—	—	—
Лаборатория им. Линкольна, Массачусетский технологический институт	Милстон-Хилл, Вестфорд, Шт. Массачусетс. США	25,6	23	—	500	—	—
Ионосферная обсерватория Корнельский университет	Аресибо, Пуэрто-Рико, США	305	70 12,5	150 450	2500	Сферическая чаша	$\pm 20^\circ$ от вертикали
Джикамарка, Лаборатория Национального Бюро стандартов, США	Лима, Перу	100×100 диполей	600	240	5000	Синфазная решетка	—

сопровождения¹ выбранного источника, позволяют проводить обзор (сканирование) неба в некоторой окрестности вокруг источника. Такой режим используется при измерении распределения интенсивности радиоизлучения по диску планеты.

Вторая ЭВМ на современных радиотелескопах используется для первичной обработки результатов измерений. Входным сигналом для этой ЭВМ являются текущие координаты и значения напряжений на выходе радиометра, пропорциональные интенсивности радиоизлучения исследуемого и калибровочных источников. По этим данным ЭВМ рассчитывает распределение интенсивности радиоизлучения в зависимости от координат, т. е. строит карту радиоярких температур исследуемого источника.

Для калибровки интенсивности принятых сигналов используется сопоставление радиоизлучения от исследуемого источника с некоторыми эталонами, которые могут быть как первичными, так и вторичными. Метод первичного эталонирования, так называемый метод «искусственной луны», был разработан советским ученым В. С. Троицким. В данном методе измерения первичным эталоном является радиоизлучение поглощающего диска, установленного перед антенной радиотелескопа. С помощью метода «искусственной луны» в Горьковском радиофизическом институте был проведен большой цикл прецизионных измерений радиоизлучения Луны и других источников.

В качестве вторичных эталонов обычно используют сигналы радиоизлучения некоторых дискретных источников (например, радиоисточников в созвездиях Кассиопея, Лебедь, Дева, Телец, а также некоторых квазаров). Иногда в качестве вторичного эталона используется радиоизлучение Юпитера.

Результаты радиоисследований Луны и планет

Меркурий. Оптические наблюдения показали, что Меркурий имеет низкий коэффициент отражения, зна-

¹ Механизмы систем наведения и сопровождения источников в современных радиотелескопах обладают чрезвычайно высокой точностью. Предельно достигнутая точность наведения антенн составляет 3".

чение которого близко к коэффициенту отражения Луны. Этот низкий коэффициент отражения и близость планеты к Солнцу согласуются с очень высокой дневной поверхностной температурой. В подсолнечной точке температура поверхности на минимальном расстоянии планеты от Солнца доходит до $+430^{\circ}\text{C}$ (ночные температуры в экваториальной зоне значительно выше, чем на Луне, и достигают -20°C). У Луны и Меркурия близки и другие оптические характеристики, что свидетельствует о примерно одинаковой в среднем микроструктуре их поверхностей.

Меркурий является наиболее сложной из планет земной группы с точки зрения проведения радиофизических наблюдений. Как известно, Солнце является мощным источником радиоизлучения, а так как максимальное угловое отклонение Меркурия от Солнца (элонгация) не превышает 20° , то фоновое излучение Солнца оказывает большое влияние на результаты измерения радиоизлучения этой планеты.

Наблюдения радиоизлучения Меркурия весьма скудны. Первое измерение его радиоизлучения было сделано вблизи элонгации в 1962 г. на длине волны 3,6 см. Затем были проведены еще измерения на пяти длинах волн (от 3,3 мм до 11,3 см). По данным этих измерений радиояркая температура Меркурия выше радиояркой температуры Луны и составляет в среднем около 320°K (что является следствием более высокой поверхностной температуры этой планеты по сравнению с Луной).

На волнах миллиметрового диапазона отмечены сильные временные изменения яркостной температуры, увеличивающиеся с уменьшением длины волны и коррелирующие как с изменением фазы Меркурия, так и с долготой центрального меридиана планеты.

Измерения радиоизлучения на разных длинах волн показали, что с уменьшением длины волны возрастают суточные вариации радиояркой температуры. По измерениям вариаций радиоизлучения на длине волны 3,3 мм было определено отношение величины глубины проникновения электромагнитной волны¹ к величине глубины проникновения суточной тепловой волны δ .

¹ Глубина проникновения электромагнитной волны определяется по величине ослабления мощности электромагнитной энергии при ее прохождении от поверхности в глубь планеты. Глубина про-

Параметр δ позволяет оценить относительный тангенс угла потерь вещества, т. е. отношение величины тангенса угла потерь электромагнитной энергии в веществе верхнего покрова планеты к значению плотности этого вещества. А это, в свою очередь, позволяет определить процентное содержание окислов кремния (SiO_2) в веществе.

Значение δ для Меркурия, как оказалось, в 2 раза меньше, чем для Луны. Это соответствует большему процентному содержанию SiO_2 в веществе верхнего покрова Меркурия, т. е. говорит о том, что меркурианские породы являются либо средними, либо кислыми, в то время как на Луне большая часть поверхности покрыта основными породами (базальты).

Измерения радиоизлучения на длине волны 3,3 мм показали также, что теплофизические свойства грунта Меркурия примерно соответствуют лунным. Параметр тепловой инерции γ , равный обратной величине корня квадратного из произведения плотности, теплопроводности и теплоемкости вещества, имеет значение по данным этих измерений 1000 ± 500 , что соответствует сильно раздробленным породам.

Значения параметра тепловой инерции, полученные по данным измерения радиоизлучения на более длинных волнах, оказались значительно меньшими. Вероятно, это связано с меньшей раздробленностью грунта на большей глубине.

Измерения радиоизлучения Меркурия в миллиметровом диапазоне показали также, что радиояркостьная температура диска планеты зависит не только от расстояния до Солнца и фазы освещения Солнцем, но и от долготы центрального меридиана: на планете были обнаружены жаркие, горячие и прохладные зоны (с шириной порядка 60° по долготе). Средние температуры в этих зонах отличались друг от друга до 40°C .

Радиолокационные исследования Меркурия были выполнены в 1962 г. с помощью планетного радиолокатора СССР на волне $\lambda = 43$ см и с помощью голдстоунского радиолокатора Центра дальней космической

никновения суточной тепловой волны соответствует глубине поверхностного слоя планеты, на которой величина колебания температуры поверхности за время суток уменьшается в 2,7 раза.

связи США на волне $\lambda=12,5$ см. Впоследствии радиолокация Меркурия была также проведена в ионосферной обсерватории Аресибо на волне $\lambda=70$ см. Эти радиолокационные измерения показали, что коэффициент отражения Меркурия почти не зависит от длины волны, а вариации этого параметра слабо коррелируют с долготой «подрадарной» точки.

Таким образом, анализ радиофизических наблюдений планеты Меркурий показывает, что ее грунт по теплофизическим и электрическим характеристикам близок к грунту горных районов Луны.

В 1969 г. на длине волны 3,8 см были проведены измерения рельефа поверхности. Они показали, что поверхность Меркурия не сильно отличается от сферической, а максимальные перепады высот не превышают 7 км (при максимальной ошибке определения ± 3 км). В этих измерениях разрешение по долготе составляло около 400 км.

Информация о шероховатости поверхности была получена только из радиолокационных наблюдений на волне 12,5 см. Согласно измерениям ширина «доплеровского» спектра Меркурия соответствует спектру Луны на той же длине волны с учетом разницы их угловых скоростей. Это позволило сделать заключение, что на волне $\lambda=12,5$ см шероховатость поверхности Меркурия и Луны примерно одинакова. Близость меркурианского рельефа к лунному была блестяще подтверждена фотографиями с автоматической межпланетной станции «Маринер-10», полученными при пролетах станции вблизи планеты Меркурий в 1974—1975 гг.

Венера. Венера является самой, можно сказать, «радиофизической» планетой, так как плотный облачный слой позволяет дистанционно исследовать с Земли подоблачную атмосферу и поверхность планеты только лишь радиометодами. Первые наблюдения радиоизлучения Венеры, выполненные в 1956 г. на длинах волн 3,15 и 9,4 см, показали, что радиояркостная температура примерно в 2 раза выше ожидаемой температуры поверхности. (В те годы считалось, что условия у поверхности Венеры по температуре, давлению и газовому составу атмосферы примерно соответствуют земным.) В последующие годы измерения радиоизлучения Венеры были выполнены в диапазоне длин волн от 1 мм до 70 см. При этом большинство экспериментов

было проведено во время нижних соединений, когда видимая с Земли часть поверхности Венеры не освещена Солнцем и угловой размер планеты максимален. Большой вклад в радиоастрономические исследования Венеры внесли сотрудники радиоастрономической лаборатории Физического института АН СССР, которые под ру-

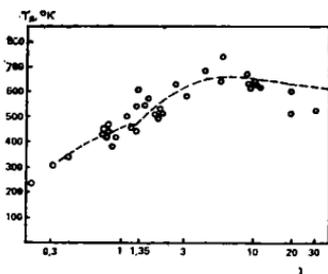


Рис. 12. Спектр радиояркости температур Венеры. Пунктиром показан расчетный спектр радиоизлучения при 0,1% -ном содержании водяного пара и 97% -ном содержании углекислого газа в атмосфере планеты

ководством А. Д. Кузьмина выполнили измерения радиоизлучения планеты на ряде длин волн миллиметрового и сантиметрового диапазонов.

Спектр радиоизлучения Венеры имеет сложную форму (рис. 12) — характерные завалы на определенных волнах (короче 3 см и длиннее 20 см). После проведения прямых измерений атмосферы планеты с помощью автоматических советских станций серии «Венера» стали более понятными результаты выполненных ранее радиофизических исследований. Так, завал в коротковолновой части спектра ($T_{я} = 300^{\circ}\text{K}$ на $\lambda = 3$ мм), видимо, обязан плотной и протяженной атмосфере, состоящей в основном из углекислоты с давлением у поверхности более 90 атм. Высокие радиояркие температуры на волне $\lambda = 6\text{—}10$ см, по всей вероятности, вызваны высокой термодинамической температурой поверхности ($\sim 750^{\circ}\text{K}$). Причина завала спектра радиоярких температур на волнах, длиннее 20 см, не установлена до сих пор, хотя на этот счет выдвигалось несколько гипотез.

Наблюдаемое радиоизлучение планеты не имеет значительных временных вариаций, что объясняется большой теплоемкостью атмосферы, приводящей к почти неизменной температуре на экваторе в течение длинных венерианских суток. Малые широтные вариации яркостной температуры, отмеченные при интерферометрических измерениях радиоизлучения на волне

11 см, также вызваны, по-видимому, малым наклоном оси вращения Венеры к плоскости эклиптики.

Первые интерферометрические измерения радиоизлучения Венеры, выполненные А. Д. Кузьминым и Б. Кларком в 1964 г., показали, что на волне $\lambda = 10$ см основная часть радиоизлучения исходит от твердой поверхности, а коэффициент его поляризации соответствует диэлектрической проницаемости вещества поверхностного слоя, равной $\epsilon = 2,2 \pm 0,2$ (если поверхность планеты, как и предполагалось при этом, ровная, а вклад атмосферы в радиоизлучение не учитывался). Учет различного ослабления радиоволн в атмосфере для «подрадарной» точки и для районов, находящихся у лимба планеты, увеличивает значение ϵ до 3,6. Эти же измерения позволили впервые определить радиус твердой оболочки планеты с ошибкой около 50 км. Более точные данные о радиусе с ошибкой около 2 км были получены с Земли позднее при помощи радиолокационных методов.

Следует отметить, что результаты измерений спектра радиоярких температур и их временных вариаций позволили сделать оценку (очень приближенную) температуры и давления у поверхности с учетом данных основного химического состава атмосферы планеты, полученных аппаратурой автоматической межпланетной станции «Венера-4». Полет последующих автоматических станций серии «Венера» дал наиболее точную информацию о высотных профилях температуры, давления и о химическом составе атмосферы. Эти данные непосредственных измерений позволили по-новому взглянуть на результаты радиоастрономических и радиолокационных измерений планеты. В частности, они показали, что на волнах, длиннее 6 см, не может быть существенных временных вариаций радиояркой температуры в течение солнечных суток, так как радиоизлучение на этих волнах в основном формируется поверхностным слоем планеты. При известных химическом составе главных компонент атмосферы и высотных профилях температуры и давления удалось произвести оценку содержания водяного пара и аммиака в атмосфере по коротковолновому завалу спектра ярких температур. Эти компоненты были измерены приборами автоматических станций «Венера». Однако результаты оценок по радиоастрономическим измере-

ниям концентраций H_2O и NH_3 существенно разошлись с результатами прямых измерений. Причина такого расхождения пока еще не ясна.

Большое значение для физики атмосферы планеты Венера имели результаты фотографирования ее облачного покрова в ультрафиолетовом диапазоне с борта автоматических межпланетных станций «Маринер-10», «Венера-9» и «Венера-10». Эти фотографии выявили наличие на планете глобальных циркуляционных процессов в верхней атмосфере, способствующих интенсивному перемещению атмосферы.

Первая попытка радиолокационных исследований Венеры была предпринята в 1958 г. на длине волны 68 см в лаборатории им. Линкольна Массачусетского технологического института. Однако принятый сигнал, вероятно, был обусловлен каким-то фоновым эффектом, так как эффективная площадь рассеяния оказалась равной 1. (По этим данным поверхность Венеры должна бы быть металлической.)

Первая успешная радиолокация Венеры была проведена во время нижнего соединения 1961 г. Институтом радиотехники и электроники АН СССР ($\lambda=43$ см), лабораторией реактивного движения Калифорнийского технологического института ($\lambda=12,5$ см), лабораторией им. Линкольна Массачусетского технологического института ($\lambda=23$ см) и обсерваторией Джодрелл-Бэнк ($\lambda=73$ см). Впоследствии радиолокационные исследования Венеры проводились также ионосферной обсерваторией в Аресибо ($\lambda=70$ см) и обсерваторией Джикамарка в Перу ($\lambda=600$ см). Радиолокационные исследования Венеры были выполнены в диапазоне длин волн от 3,6 до 780 см. Применительно к Венере с помощью радиолокации решались следующие задачи: 1) определение направления и периода собственного вращения планеты; 2) уточнение параметров орбиты планеты; 3) уточнение величины астрономической единицы — среднего расстояния между Землей и Солнцем; 4) определение топографии поверхности и проведение радиолокационного картографирования; 5) определение коэффициента отражения радиоволн.

Венера имеет постоянный облачный покров, поэтому при наблюдении в наземные телескопы не видны детали ее поверхности, по движению которых можно было бы судить о направлении и периоде собственного вра-

щения планеты, а также о наклоне оси вращения планеты к плоскости ее орбиты.

Эти данные были получены только путем анализа «доплеровских» спектров отраженных от Венеры радиолокационных сигналов. Период вращения определяется по ширине «доплеровского» спектра, так как его ширина пропорциональна угловой скорости вращения планеты. Изменение формы спектра происходит, видимо, за счет перемещения по диску планеты сильно отражающих участков поверхности, что вызывает смещение по «доплеровскому» спектру планеты пика от соответствующего сильно отражающего участка поверхности. Измерения на длинах волн 12,5; 43 и 70 см в течение ряда нижних соединений впервые позволили определить, что направление вращения Венеры обратное, т. е. при наблюдении с северного полюса планеты ее вращение происходит по часовой стрелке (в то время как остальные планеты, кроме Урана, поворачиваются против часовой стрелки). Период собственного вращения Венеры, как оказалось, составляет 242,98 солнечных земных суток, что на 0,1% меньше периода, при котором Венера между нижними соединениями совершает 4 полных оборота вокруг Солнца. Поэтому за каждое нижнее соединение наземный наблюдатель видит примерно одну и ту же часть поверхности планеты. Радиолокационные измерения показали также, что ось вращения планеты отклонена не более чем на 6° от нормали к плоскости орбиты планеты. Международным астрономическим союзом в 1970 г., по данным радиолокационных измерений, был принят период вращения Венеры, равный 243,0 земных суток.

Измерение эффективной площади рассеяния Венеры на длинах волн 3,6 и 3,8 см выявило сильное ослабление отраженного сигнала по сравнению с результатом измерений в дециметровом диапазоне. Этот факт, а также уменьшение радиоярких температур в миллиметровом и в коротковолновой части сантиметрового диапазона свидетельствуют о наличии каких-то поглощающих компонент в венерианской атмосфере. Данные компоненты удалось впоследствии определить с помощью прямых измерений химического состава атмосферы планеты, выполненных на автоматических станциях «Венера-4, -5, -6, -7, -8». Ими оказались углекислый газ, водяной пар и аммиак. Пользуясь данны-

ми о химическом составе атмосферы и высотных профилях температуры и давления, полученных также прямыми измерениями, стало возможным оценить ослабление радиосигналов в атмосфере, а также вклад атмосферы в собственное радиоизлучение планеты. Проведение таких расчетов показало, что измеренные с помощью автоматических станций «Венера» концентрации водяного пара и аммиака превышают соответствующие значения, определенные из радиофизических измерений в миллиметровом и сантиметровом диапазонах. Поэтому для оценки свойств венерианского грунта необходимо использовать радиолокационные данные, полученные в дециметровом и метровом диапазонах, где невелико влияние атмосферы на результаты измерений характеристик отражения поверхности. Радиолокационные измерения показали, что с ростом длин волн в дециметровом и метровом диапазонах наблюдался некоторый рост коэффициента отражения (а это свидетельствует об уплотнении грунта с глубиной). Так, если по измерениям на волне $\lambda=12,5$ см $\rho=1,8 \pm \pm 0,4$ г/см³, то по измерениям на волне $\lambda=180$ см $\rho=3,2 \pm 1,2$ г/см³, т. е. грунт Венеры оказался более плотный, чем грунт Луны.

Анализ характеристик отражения планеты показал, что с ростом длин волн диаграмма обратного рассеяния сужается, а это соответствует уменьшению значений среднеквадратичных углов наклона при увеличении базы. По этим данным, рельеф Венеры в среднем более ровный, чем у Луны: на одинаковых длинах волн среднеквадратичные углы наклона поверхности Венеры примерно в 2 раза меньше, чем у Луны.

Измерение дальности до Венеры позволило определить перепад высот с точностью 150 м в экваториальном районе планеты. По этим данным максимальный перепад высот соответствует 4—5 км при разрешении по поверхности менее 400 км.

В последние годы делались многочисленные попытки радиолокационного картографирования поверхности Венеры с Земли с высоким разрешением. Однако из-за относительно широких диаграмм направленности антенн наземных радиолокаторов не удавалось получить раздельного радиоизображения северного и южного полушарий планеты. Раздельное радиоизображение было получено лишь в 1972 г. методом частотно-временного

картографирования на волне $\lambda = 12,5$ см при приеме отраженных сигналов на две антенны, разнесенные между собой на 21 км. Полученное радиоизображение участка поверхности диаметром 1500 км имело разрешение 10 км. На нем было обнаружено 10 кольцевых кратеров с диаметром от 35 до 150 км. Причем кратеры оказались менее глубокими, чем аналогичные кратеры на Луне и Марсе. Радиолокационное картографирование также показало на наличие большего, чем на Луне, двадцатикратного радиолокационного контраста отдельных образований. Линейные размеры «радиоярких» образований на Венере достигают 1000 км.

Радиолокационные наблюдения показывают, что как макро-, так и микро-рельеф на Венере сглажен по сравнению с лунным или марсианским. Видимо, причиной этому является плотная атмосфера, приводящая к высоким температурам и давлениям у поверхности.

Обнаружение крупномасштабных формаций на поверхности планеты, скрытой постоянным облачным покровом от наземного наблюдения, является одним из важнейших достижений планетной радиолокации.

Большим достижением космической науки и техники явились получение и передача на Землю панорам поверхности Венеры в местах посадки автоматических станций «Венера-9, -10». На фотографии, полученной в месте посадки АМС «Венера-9», видна россыпь камней с линейными размерами более 1 м. Фотография в месте посадки АМС «Венера-10» указывает на следы лавовых потоков в этом районе планеты, отстоящем от места посадки АМС «Венера-9» на 2200 км.

Марс. Разреженная атмосфера Марса и отсутствие облачных покровов, закрывающих на долгое время большие пространства поверхности от наземного наблюдателя, позволяют исследовать планету и ее поверхность методом оптической и инфракрасной астрономии. Информация о подповерхностных слоях грунта, также как и на Луне, получается с помощью радиофизических измерений.

В связи с тем что наблюдения с Земли вариаций радиоярких температур при различных условиях освещения планеты Солнцем (при разных фазах Марса) затруднительны из-за значительного изменения углового размера планеты при движении ее по орбите, то нужен был другой метод анализа, чем лунационно-затмен-

ный. Таким методом явился метод анализа спектра радиоярких температур на волнах миллиметрового диапазона при одной и той же фазе освещения планеты Солнцем, разработанный В. С. Троицким. Этот метод позволил определить теплофизические параметры грунта с использованием данных наблюдения Марса в инфракрасном диапазоне. В. С. Троицкий и его сотрудники О. Б. Щуко и В. Д. Кротиков показали, что при анализе радиоизлучения планеты необходимо учитывать ее расстояние от Солнца, так как из-за большого эксцентриситета орбиты Марса условия ее облучения Солнцем при разных противостояниях существенно изменяются. Это вызывает изменение теплового режима поверхностного слоя, а следовательно, и радиоизлучения планеты. Поэтому сопоставление результатов измерений радиоизлучения во время разных противостояний требует значительно более сложных расчетов, чем выполнялись до сих пор.

Первые наблюдения радиоизлучения Марса были сделаны в 1956 г. на волне 3,15 см С. Мейером, Т. МакКоллафом и Р. Слонейкером. Они же в 1956—1957 гг. провели на этой длине волны измерения радиоизлучения Венеры и Юпитера. Измеренная температура Марса оказалась равной около 220°K . Позднее были выполнены многочисленные измерения в диапазоне длин волн от 1 мм до 21 см. Средняя радиояркая температура планеты оказалась равной 210°K .

Анализ спектра излучения Марса в миллиметровом диапазоне позволил определить отношение величин глубины проникновения радиоволн и суточной тепловой волны, задаваемое формулой $\delta = m \cdot \lambda$. Параметр m , по оценкам ученых, использовавших разные ряды наблюдений, колебался в весьма широких пределах (от $m < 1$ до $m > 10$). Расчеты В. Д. Кротикина и О. Б. Щуко, выполненные с учетом вариаций теплового режима планеты при разных противостояниях, дали значения $m = 5-6$, что примерно в 2 раза превысило значение m для Луны. Это свидетельствует о том, что вещество верхнего покрова Марса в среднем для всей поверхности планеты имеет в 2 раза большую электропроводность в радиодиапазоне. Возрастание электропроводности марсианского грунта, как предполагают специалисты, связано с наличием в нем окислов железа. Результаты дистанционных исследований грунта

Марса с борта автоматических станций показали, что марсианский грунт имеет также силикатную основу, как и грунт Луны.

Данные об электропроводности вещества верхнего покрова Марса были получены при сопоставлении результатов измерения излучения планеты в радио- и инфракрасном диапазонах. Эти измерения были выполнены с помощью советских автоматических станций «Марс-3» и «Марс-5». Полученные значения относительного тангенса угла потерь соответствуют либо кислым, либо средним породам с относительным содержанием кремнезема более 50%. Эти данные оказались близкими к результатам измерения процентного содержания кремнезема в пылевом облаке Марса (данные измерения были проведены с помощью инфракрасного спектрометра искусственного спутника Марса «Маринер-9»).

Впервые успешные радиолокационные наблюдения Марса были проведены во время противостояния 1963 г. сотрудниками Института радиотехники и электроники АН СССР на длине волны 43 см и сотрудниками лаборатории реактивного движения Калифорнийского технологического института США на длине волны 12,5 см. Впоследствии радиолокационные измерения Марса были продолжены во время противостояний 1965, 1967, 1969 и 1971 гг. При этих измерениях были исследованы области широт от -18 до $+22^\circ$ на длинах волн от 3,8 до 70 см. Наиболее многочисленными были измерения на волнах 3,8 и 12,5 см. В измерениях 1971 г. было достигнуто разрешение по поверхности 8×80 км ($\lambda = 12,5$ см) вдоль трасс, проходивших почти по одной и той же параллели. В ходе радиолокационных наблюдений измерялись характеристики отражения (эффективная площадь рассеяния, и мгновенный «доплеровский» спектр отраженного сигнала), а также расстояние между наземным пунктом и «подрадарной» точкой. При дальности до Марса около 60 млн. км в экспериментах 1971 г. была получена точность измерения дальности до планеты ± 75 м. Измерение расстояния до Марса со столь высокой точностью позволило решить две задачи — уточнить движение Марса по орбите вокруг Солнца и выполнить топографические измерения рельефа планет. По данным этих измерений перепад высот на Марсе достигает 14 км (что не намного больше мак-

симального перепада высот на Луне). Попытки найти для Марса корреляции оптического альбеда с высотами и наклонами пока не дали результатов: различные светлые и темные области находятся как на возвышенных, так и на низменных местах. Анализ диаграмм обратного рассеяния Марса показал, что с уменьшением длины волны диаграммы, как правило, расширяются. Это, видимо, свидетельствует о росте количества мелких образований на поверхности по сравнению с более крупными. Обработка радиолокационных сигналов указывает на то, что в среднем для Марса не наблюдается заметного изменения коэффициента отражения с ростом длины волны в диапазоне 3,8—70 см. Вероятно, что грунт этой планеты примерно однороден с глубиной и имеет среднюю плотность $\rho \approx 1,4$ г/см³. Самый верхний, переработанный метеоритами слой грунта в среднем имеет толщину в несколько сантиметров. Однако локальные вариации плотности грунта, по данным наземных радиолокационных наблюдений, весьма велики и составляют величину $\rho_{\min} \approx 0,5$ г/см³ и $\rho_{\max} = 3,0$ —3,2 г/см³, т. е. грунт Марса в разных районах изменяется по своей структуре от весьма рыхлого до плотного, соответствующего плотности скальных пород.

Юпитер. Планеты-гиганты, или, как их еще называют, большие планеты, — Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун — имеют весьма схожие между собой характеристики и резко отличаются от планет земной группы: большие планеты имеют быстрое вращение вокруг своей оси; малые средние плотности; весьма протяженные газовые атмосферы, высота которых составляет значительную часть радиуса планет. Из-за большого расстояния от Солнца надоблачные температуры у этих планет весьма низкие (ниже —120°С).

Одной из особенностей Юпитера, ближайшей к Солнцу и Земле планеты-гиганта, является наличие у него сильного собственного магнитного поля, состоящего из двух компонент — внутреннего дипольного поля и внешнего недипольного поля. Внутреннее дипольное поле по своей структуре и характеристикам подобно магнитному полю Земли. Напряженность этого магнитного поля на экваторе Юпитера примерно на порядок выше земного, а магнитные моменты Юпитера и Земли отличаются примерно на 4 порядка и имеют противоположную полярность. Внешнее, недипольное, магнит-

ное поле Юпитера было обнаружено автоматической межпланетной станцией «Пионер-10». Это поле располагается на расстоянии от 3,4 до 10,5 млн. км от планеты.

В радиоастрономическом плане Юпитер изучен весьма подробно. Первые измерения радиоизлучения планеты были выполнены в 1956 г. на длине волны 3,15 см. Измеренная радиояркая температура оказалась равной 145°K , что выше яркостной температуры планеты, определенной в инфракрасном диапазоне ($T_{\text{я}} = 130^\circ \text{K}$). Таким образом, эти радиоастрономические измерения позволили определить излучение подоблачной атмосферы.

Последующие измерения радиоизлучения на волне 10,3 см дали избыточную радиояркую температуру ($T_{\text{я}} \approx 600^\circ \text{K}$) даже по сравнению с предсказанной в соответствии с теорией теплового радиоизлучения. Проведенные затем измерения в более длинноволновом диапазоне (в диапазоне дециметровых волн) установили удивительный факт — область радиоизлучения планеты превысила угловой размер, определяемый из оптических наблюдений и соответствующий высоте верхней границы облаков. Такая повышенная яркость и более широкие границы радиоизлучения впоследствии стали понятны, когда было выяснено, что это радиоизлучение является синхротронным излучением электронов, тормозящихся в сильном магнитном поле планеты.

Радиоизлучение планеты Юпитер измерено в весьма широком диапазоне от 2 мм до 1500 м, и его спектр можно условно разделить на 4 диапазона: 1) миллиметровых волн (тепловое излучение); 2) сантиметровых волн (смешанное тепловое и нетепловое излучение); 3) дециметровых волн (спокойное нетепловое излучение); 4) метровых и декаметровых волн (спорадическое — хаотическое импульсное нетепловое излучение).

Таким образом, в области миллиметровых волн радиоизлучение Юпитера, генерируемое верхней частью подоблачной атмосферы планеты, является тепловым и хорошо описывается тепловой моделью.

Радиоизлучение на длинах волн более 10 см имеет примерно постоянный поток, не зависящий от длины волны, со спектральной плотностью $6,7 \cdot 10^{-26} \text{Вт} \cdot (\text{м}^2 \text{Гц})^{-1}$. Это соответствует тому, что изменение

наблюдаемой радиояркостной температуры пропорционально квадрату длины волны. Такая зависимость наблюдается для длин волн около 1 м.

Излучение Юпитера в дециметровом диапазоне носит спокойный характер без резких изменений интенсивности и оказалось по своему характеру близким к излучению радиогалактик и остатков Сверхновых звезд, например Крабовидной туманности, которое хорошо изучено радиоастрономами.

Обнаружение нетеплового радиоизлучения Юпитера способствовало открытию радиационных поясов этой планеты, структура которых оказалась более сложной, чем у радиационных поясов Земли. Если граница внешнего радиационного пояса Земли в экваториальной плоскости находится примерно в 40—50 тыс. км от поверхности, то внешний радиационный пояс Юпитера простирается до 10,7 млн. км. Более сложная конфигурация радиационных поясов Юпитера, видимо, обязана более быстрому вращению этой планеты по сравнению с вращением Земли.

Благодаря сильному магнитному полю в радиационных поясах Юпитера концентрируются заряженные частицы высоких энергий, которые поочередно разгоняются и тормозятся дипольным магнитным полем планеты. При торможении они излучают радиоволны дециметрового диапазона. Согласно теории этого излучения оно должно быть поляризованным и иметь размеры излучающей области, существенно превышающие размеры диска планеты. При этом конфигурация поля нетеплового радиоизлучения должна примерно повторять конфигурацию радиационных поясов.

Для окончательного подтверждения относительно механизма излучения Юпитера в дециметровом диапазоне длин волн нужно было провести отдельное измерение радиоизлучений диска планеты и радиационных поясов. Для этого были выполнены радиоинтерферометрические измерения радиоизлучения Юпитера с высоким угловым разрешением на длинах волн 10,4 и 31 см, которые показали, что в экваториальной плоскости область радиоизлучения примерно в 3 раза превышает диаметр планеты, в то время как в ортогональной к ней плоскости соответствует диску планеты. Кроме того, радиоизлучение радиационных поясов оказалось поляризованным. Таким образом, предполагаемый механизм

дециметрового радиоизлучения был экспериментально подтвержден. На рис. 13 показано распределение той части радиоярких температур по диску Юпитера, которые обязаны своим происхождением радиоизлучению за счет радиационных поясов планеты. Эти измерения были выполнены в 1963 г. Г. Берджем и Д. Моррисом на длине волны 10,4 см.

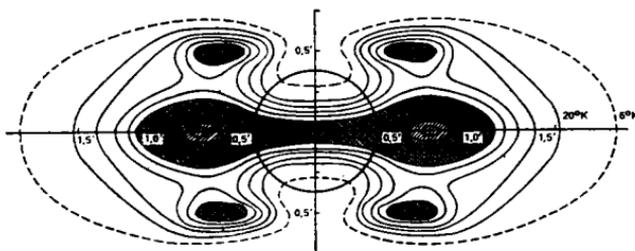


Рис. 13. Карта распределения дециметрового радиоизлучения радиационных поясов Юпитера. Линии равных температур (изотермы) даны через 20°K . Шкала угловых размеров (в минутах дуги) дана для расстояния от Земли до Юпитера 605 млн. км

Весьма неожиданными оказались результаты измерения радиоизлучения Юпитера в метровом и декаметровом диапазонах. Оказалось, что это радиоизлучение имеет переменную интенсивность и носит спорадический нетепловой характер. Это спорадическое нетепловое радиоизлучение Юпитера, имеющее вид кратковременных всплесков переменной длительности и большой интенсивности, было обнаружено еще в 1955 г. на длине волны 22 м.

В 1956—1965 гг. были проведены многочисленные измерения в диапазоне длин волн от 4 до 1500 м. Они показали, что длительность всплесков декаметрового излучения колеблется в весьма широких пределах от нескольких миллисекунд до нескольких суток. Интенсивность излучения сильно зависит от длины волны, возрастая с ее увеличением (при изменении длины волны от 10 до 60 м поток радиоизлучения возрастает в 1000 раз). Спектральная плотность мощности декаметрового излучения огромна ($\sim 10^8$ Вт/Гц). Юпитер после Солнца оказался в декаметровом диапазоне самым мощным источником излучения.

Источник декаметрового излучения Юпитера имеет малые угловые размеры и, по-видимому, находится под облачным слоем планеты. Характер спорадического радиоизлучения изменяется со временем; иногда регистрируется группа всплесков общей продолжительностью в несколько секунд или несколько минут. Такое изменение можно объяснить вариациями характеристик ионосферы планеты и межпланетной плазмы. Иногда характер всплесков радиоизлучения напоминает шумовые бури, которые продолжаются несколько часов и напоминают земные индустриальные помехи, рассмотренные нами ранее.

Суммарная мощность излучения Юпитера в этом диапазоне составляет $5 \cdot 10^{10}$ Вт. Всплески декаметрового излучения коррелируют с солнечной активностью: максимум всплесков обычно происходит во времена минимума солнечной активности.

Одной из особенностей Юпитера является его дифференциальное вращение, вследствие которого период вращения областей на разных широтах различен. Так, видимые особенности в экваториальной плоскости планеты имеют период вращения около 9 ч 50,5 мин. В то же время видимые особенности на диске планеты в умеренных широтах вращаются с периодом около 9 ч 55,7 мин. Поэтому для Юпитера принято три значения периода вращения: первое — для видимых особенностей в экваториальной области; второе — для видимых особенностей в умеренных широтах; третье — для среднего периода выявления всплесков декаметрового радиоизлучения. Исследования показали, что частота появления и мощность всплесков декаметрового излучения изменяются с периодом, отличающимся от периода вращения видимых особенностей на диске планеты. Период появления всплесков декаметрового излучения соответствует периоду вращения источника излучения, равного 9 ч 55,49 мин.

Весьма интересным является то, что всплески декаметрового излучения планеты зависят от положения спутника планеты Ио на орбите относительно Юпитера. Сильнее всплески радиоизлучения наблюдаются в то время, когда Ио проходит через положение максимальной элонгации; т. е. когда линия Земля—Юпитер совпадает с направлением Юпитер—Ио угол около 90° . Правда, с положением Ио на орбите связан только

один тип всплесков, так называемые широкополосные всплески продолжительностью от одной до нескольких секунд (ширина их спектра составляет величину около 500 кГц). Более кратковременные всплески длительностью от 1 мс до 1 с с шириной спектра порядка 50 кГц не зависят от положения спутника Ио на орбите. Причина декаметрового радиоизлучения и местоположение источника этого излучения пока не установлены. Возможными механизмами образования этого излучения могут быть следующие: вращение магнитного поля планеты, колебания плазмы в ионосфере Юпитера, возмущение магнитосферы планеты при движении спутника Ио, электрические разряды в атмосфере, а также ряд других причин.

Радиоизлучение Юпитера весьма своеобразно. Суммарная энергия радиоизлучения в 2,5 раза превышает энергию, поступающую от Солнца. Каковы источники этого излучения и где они располагаются, это пока еще остается загадкой.

Радиолокация Юпитера впервые была проведена в 1963 г. сотрудниками Института радиотехники и электроники АН СССР ($\lambda=43$ см) и в лаборатории реактивного движения США ($\lambda=12,5$ см). В обоих экспериментах были зарегистрированы «отраженные» радиосигналы. Однако последующий анализ этих сигналов вызвал сомнение, являются ли они в самом деле отраженными от планеты. Так, из радиолокационного эксперимента на волне $\lambda=12,5$ см следовало, что спектр принятого сигнала должен был быть сформирован гладко отражающей и плоской областью площадью 50 000 км². Эффективная площадь рассеяния планеты при этом соответствовала бы 60% геометрической площади диска планеты, что указывало бы на поверхность, состоящую на 40% из хорошо проводящего металла и на 60% из скальных пород. Очевидно, что эти измерения были ошибочными.

Попытка получения отраженного сигнала от Юпитера в 1964 г. с помощью радиолокатора Аресибо на волне $\lambda=70$ см также не увенчалась успехом, и был установлен верхний предел для эффективной площади рассеяния, равный $\sigma/\pi a^2 < 0,0036$, что говорило о сильном ослаблении радиоволн планетной атмосферой, имеющей большую протяженность. (Если бы Юпитер по своим характеристикам отражения был подобен Луне,

то на радиолокаторе в Аресибо отраженный сигнал в 100 раз превысил бы порог его чувствительности!

В этом же 1964 г. был повторен эксперимент на волне $\lambda = 12,5$ см, однако отраженный сигнал и в этом эксперименте также не был обнаружен.

Юпитер очень сложный объект для радиолокации: протяженная водородно-аммиачная атмосфера сильно поглощает радиоволны, а большая угловая скорость вращения планеты и громадное расстояние до Земли приводят к широкому «доплеровскому» спектру и требуют высокого энергетического потенциала радиолокатора. Сигналы, принятые во время экспериментов 1963 г., могли быть обусловлены либо рассеянием радиоволн частицами верхней атмосферы, либо рассеянием радиоволн в центрах сильных бурь.

Проведенные радиолокационные и радиоастрономические измерения дали большой фактический материал о свойствах подоблачной атмосферы и более глубоких слоев Юпитера. Радиофизические исследования показали, что Юпитер является своеобразной и уникальной планетой в Солнечной системе. Многие явления, обнаруженные при исследовании этой планеты, пока не нашли своего однозначного объяснения. Поэтому к Юпитеру приковано внимание ученых многих специальностей, которые исследуют эту планету не только всем доступным арсеналом наземных средств, но и сделали первую весьма успешную попытку дистанционных исследований Юпитера с близкого расстояния при пролете автоматических межпланетных станций «Пионер-10» и «Пионер-11».

Сатурн. Радиоизлучение Сатурна впервые было обнаружено в 1957 г. на длине волны 4 см. К настоящему времени радиоизлучение планеты измерено в диапазоне длин волн от 1,2 мм до 21 см. Радиояркостная температура планеты, как оказалось, увеличивается с длиной волны, но гораздо медленнее, чем это наблюдается у Юпитера. В диапазоне длин волн до 3 см спектры излучения этих планет очень похожи.

Тот факт, что у Сатурна радиояркостные температуры выше инфракрасных, свидетельствует о формировании радиоизлучения ниже верхней границы облаков, а наблюдаемый спектр радиоизлучения планеты может быть объяснен в рамках тепловой модели, без привлечения механизма нетеплового излучения, как это имело

место для Юпитера. Повышение радиояркой температуры с ростом длины волны, видимо, соответствует излучению более нагретых и более глубоких подоблачных слоев атмосферы планеты.

Характерной особенностью Сатурна является система из трех колец, расположенных вокруг Сатурна, в плоскости экватора планеты. Расстояние от верхней границы облачного слоя Сатурна до внутреннего края первого кольца составляет около 14 тыс. км, а до наружного края третьего кольца — 77 тыс. км (толщина каждого кольца порядка 10 км). Масса вещества колец на 7 порядков меньше массы самой планеты.

В 1973 г. были проведены радиолокационные наблюдения Сатурна на длине волны 12,5 см. Отраженный сигнал был получен только от колец, а от самой планеты не наблюдался. Это объясняется тем, что атмосфера планеты, состоящая из водорода, аммиака и метана, хорошо поглощает радиоволны. Поэтому интенсивность отраженного сигнала от планеты оказалась столь мала, что не смогла быть зарегистрированной наземным радиолокатором.

Сигнал, отраженный от колец планеты, соответствовал эффективной площади рассеяния, равной 60% от геометрической площади колец. Эта величина примерно на порядок выше, чем эффективная площадь рассеяния небесных тел с твердой оболочкой: планет земной группы и астероидов Икар и Торо. По поводу столь высокой эффективной площади рассеяния колец было высказано несколько гипотез. Расчеты, выполненные, например, Г. Петтенгилом и Т. Хегфорсом, показали, что наблюдаемый феномен может быть объяснен, если кольца Сатурна состоят из ледяных частиц, 10% из которых по массе являются круглыми шариками с диаметром более 8 см.

Спектрометрические наблюдения колец Сатурна в инфракрасном диапазоне подтвердили данное предположение. Они показали, что кольца могут состоять из частиц водяного льда и инея, размер которых может доходить до 1 м.

Уран, Нептун, Плутон. Измерения радиоизлучения Урана и Нептуна малочисленны, так как принимаемое радиоизлучение близко к порогу чувствительности современных радиотелескопов. Наблюдаемые яркие температуры этих планет в сантиметровом диапазоне

сравнимы с яркостными температурами тепловой компоненты Сатурна и Юпитера. Более высокие яркостные температуры в радиодиапазоне по сравнению с инфракрасным диапазоном показывают, что радиоизлучение исходит из более глубоких слоев атмосферы. Для всех четырех больших планет — Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна — тепловое радиоизлучение хорошо объясняется излучением атмосфер, содержащих аммиак.

Измерение радиоизлучения Плутона, имеющего, по видимому, твердую оболочку, в настоящее время невозможно, так как принимаемый поток радиоизлучения от этой планеты лежит за пределами чувствительности современных радиотелескопов.

Радиолокационные исследования Урана, Нептуна и Плутона также не могут быть проведены с помощью современных планетных радиолокаторов (расчетная интенсивность отраженного сигнала намного ниже чувствительности современных радиолокаторов).

На рис. 14 даны спектры радиоизлучения больших планет, приведенные в книге «Планеты и спутники» под ред. А. Дольфуса (М., «Мир», 1974).

Луна. Первые наблюдения интегрального радиоизлучения Луны в полнолуние были выполнены в 1946 г. на длине волны 1,25 см. Затем, в 1948 г., на той же длине волны проводились измерения в течение трех лунных суток. Они показали, что радиояркая температура зависит от фазы освещения Луны Солнцем. Однако это изменение радиояркой температуры происходит с запаздыванием и с существенно меньшей амплитудой, чем изменение температуры поверхности, определяемой по инфракрасному излучению Луны. Радиоизлучение Луны измерялось в диапазоне от 1 мм до 165 см.

В Горьковском научно-исследовательском радиотехническом институте (НИРФИ) в 1961—1964 гг. под руководством В. С. Троицкого была проведена большая

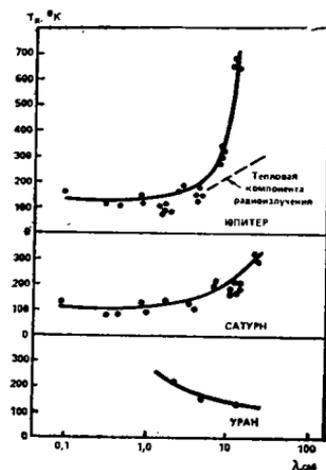


Рис. 14. Спектры радиоизлучения больших планет

серия прецизионных измерений с использованием метода «искусственной луны» (рис. 15). Целью этих измерений было определение зависимости от длины волны суточных вариаций радиояркостной температуры в диапазоне длин волн от 4 мм до 50 см. При этом средняя по диапазону яркостная температура оказалась равной 230°К. По изменению средней суточной яркостной тем-

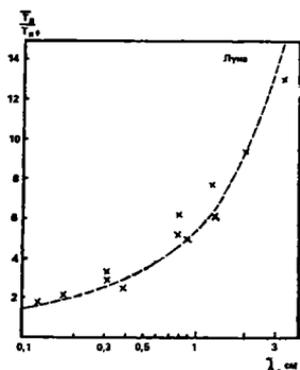


Рис. 15. Отношение среднесуточной радиояркостной температуры к изменению радиояркостной температуры в течение лунных суток. Измерения выполнены в НИРФИ с помощью метода «искусственной луны»

пературы в зависимости от длины волны В. С. Троицкий и В. Д. Кротиков определили средний поток тепла, идущего из недр Луны. Он оказался равен 10^{-6} кал(см²с)⁻¹. Эта величина лишь в 1,5 раза меньше геотермального потока от магмы Земли и несколько больше потока тепла за счет радиоактивного распада в коре Земли. Проведенные измерения показали, что концентрация радиоактивных элементов в недрах Луны выше, чем в недрах Земли.

По вариациям радиояркостных температур в течение суток на разных длинах волн был определен относительный тангенс угла потерь электромагнитной энергии в веществе верхнего покрова Луны. Он соответствовал горным породам Земли основного состава — породам типа базальтов. Измерения временных вариаций спектра радиояркостных температур позволили определить параметр тепловой инерции грунта, который имел в 1,5 раза меньшее значение, чем полученное соответствующее значение из инфракрасных измерений, что, видимо, указывает на уплотнение грунта Луны с глубиной.

Большой угловой размер Луны позволил с помощью построенных к 1960 г. радиотелескопов получить линей-

ное разрешение лучше чем $1/10$ диаметра лунного диска. Благодаря этому была выполнена целая серия измерений поляризации радиотеплового излучения Луны. Впервые такие измерения были проведены Н. С. Соболевой на большом пулковском радиотелескопе в Пулковской обсерватории АН СССР. В результате этих измерений была получена зависимость коэффициента поляризации от угла наблюдения, что позволило сделать оценку эффективной диэлектрической проницаемости ϵ и величины шероховатости поверхности диска Луны. Впоследствии поляризационные измерения были проведены в диапазоне длин волн от 4 мм до 21 см. Они показали, что ϵ постепенно увеличивается с ростом длины волны (от 1,5 до 2,3). Факт увеличения ϵ также свидетельствует об увеличении плотности грунта с глубиной.

Для объяснения наблюдаемого явления было достаточно предположить, что в среднем по диску Луны толщина очень рыхлого слоя немногим более 1 см. Этот вывод, сделанный В. С. Троицким, сильно противоречил существовавшей в те годы гипотезе о толстом рыхлом пылевидном слое верхнего покрова Луны. По оценкам разных ученых, толщина этого рыхлого слоя колебалась от нескольких метров до нескольких сотен метров. Однако запуски автоматических и пилотируемых станций на Луну блестяще подтвердили выводы В. С. Троицкого.

Использование радиотелескопов с высоким угловым разрешением ($\leq 1/10$ лунного диска) в миллиметровом диапазоне длин волн позволило измерить распределение радиоярких температур по диску Луны и их изменение в течение лунных суток. Измерения показали, что моря ночью теплее материков; кроме того, что моря медленнее нагревались и медленнее остывали, чем материки. Это свидетельствовало о различии электрических и теплофизических свойств вещества лунного грунта в морских и материковых районах. По данным измерений верхний покров морских районов в среднем оказался сложенным из более плотного вещества, чем верхний покров материков. Впоследствии такие различия были обнаружены и в образцах грунта, доставленных из разных районов Луны.

Радиолокация Луны проводилась на 19 длинах волн от 8,6 мм до 19,2 м. На большинстве длин волн были

измерены эффективная площадь рассеяния ($\sigma/\pi a^2$) — величина, показывающая, какой площади поверхности идеально отражающего диска соответствует сигнал, отраженный от сферической поверхности реальной планеты. Также были измерены диаграммы обратного рассеяния и «доплеровские» спектры.

Обработка данных интегральных измерений эффективной площади рассеяния, диаграмм обратного рассеяния (рис. 15) и «доплеровских» спектров позволила определить коэффициент отражения вещества верхнего покрова Луны на разных длинах волн, а также эффективную диэлектрическую проницаемость и плотность вещества грунта Луны. Эти данные относились к центральной части диска Луны, которая участвовала в формировании отраженного сигнала. Оценка плотности грунта по данным радиофизических измерений стала возможной после проведения многочисленных измерений различных образцов земных горных пород горьковским радиофизиком В. Д. Кротиковым, а впоследствии американскими физиками И. Ульрихом и М. Кемпбелом. Для обезвоженных горных пород различной степени раздробленности и разного состава В. Д. Кротиковым была получена связь эффективной диэлектрической проницаемости ϵ и плотности ρ . Такая же связь между ϵ и ρ , определенная В. Д. Кротиковым для предполагаемых аналогов лунного грунта, впоследствии была экспериментально подтверждена и для лунных пород при исследовании доставленных с Луны образцов в земных лабораториях.

Результаты интегральных радиолокационных наблюдений Луны в широком частотном диапазоне показали, что с ростом длины волны возрастает коэффициент отражения. Так как глубина проникновения радиоволн увеличивается с ростом длины волны, то этот факт, видимо, связан с ростом плотности грунта. Последнее было экспериментально доказано при анализе лунного грунта, собранного с разных глубин.

Радиолокационное картографирование Луны было проведено на длинах волн 3,8; 23 и 70 см с линейным разрешением по поверхности от 5 до 1 км. (Следует сказать, что флуктуации коэффициента преломления земной атмосферы не позволяют реализовать линейное разрешение на Луне при наблюдении с помощью даже наземных оптических телескопов лучше 0,7 км.)

Оказалось, что все старые кратеры с развитыми лунными системами, такие, как кратеры Тихо, Коперник, Теофил, Аристарх, имеют большую «радиолокационную яркость» и обладают не только радиолокационными, но и тепловыми аномалиями — имеют более высокие ночные температуры, чем окружающие их области. Это, вероятно, связано с большей плотностью вещества покрова, что и определяет большую отражательную способность в радиодиапазоне и меньшую тепловую инерцию. Карты радиолокационной отражательной способности очень сходны с оптическими фотографиями (на последней странице обложки приведена радиолокационная карта района кратера Тихо). Это вызвано тем, что интенсивность отраженного сигнала зависит в большей степени от наклонов поверхности, чем от плотности грунта.

Заключение

Мы рассмотрели основные результаты радиоастрономических и радиолокационных измерений характеристик Луны и планет с Земли. Наземная радиолокация и радиоастрономия сделали очень много для познания физических характеристик Луны и планет — позволили оценить тепловой режим верхних покровов планет земной группы, определить состав пород планетных грунтов, оценить структуру вещества верхнего покрова, получить богатый материал о физических характеристиках Луны и планет, о рельефе поверхности, структуре и о составе их поверхностных слоев. Радиолокация позволила также уточнить законы движения Луны и планет, определить их размеры и форму с весьма высокой точностью.

Сопоставим результаты этих исследований.

1. Луна и планеты земной группы. Если сравнить эти небесные тела по принципу убывания значений основных параметров, полученных из радиофизических наблюдений, то тогда по коэффициенту отражения, диэлектрической проницаемости и плотности грунта планеты расположатся в следующей последовательности: Венера, Марс, Луна, Меркурий, а по максимальному перепаду высот: Марс, Луна, Венера и, наконец, по

Таблица 4

Параметр	Луна	Меркурий	Венера	Марс
1. Средний коэффициент отражения поверхности в сантиметровом диапазоне	0,04	0,05	—	0,07
в дециметровом диапазоне	0,06	0,06	0,12	0,07
в метровом диапазоне	0,12	—	0,16	—
2. Средняя эффективная диэлектрическая проницаемость верхнего покрова толщиной около 1 м	2,5	2,5	4,3	2,9
3. Средняя плотность слоя грунта толщиной около 1 м, г/см ³	1,2	1,2	2,2	1,4
4. Вариации плотности грунта (min/max) в верхнем слое толщиной около 1 м, г/см ³	0,7—2,8 *	0,8—1,4	—	0,5—2,8
5. Максимальные перепады высот по данным радиолокационных измерений, км	13 **	7	4	14
6. Среднеквадратичные углы наклонов поверхности по измерениям:				
на 10 см	10	8	5	3,5
» 70 см	7	—	4	2

* По данным радиолокационных измерений с космических аппаратов.

** По оптическим измерениям.

средним наклонам поверхности на расстоянии 1 м: Луна, Меркурий, Венера, Марс.

Основные характеристики планет земной группы, полученные из радиофизических наблюдений с Земли, приведены в табл. 4.

2. Большие планеты. Исследование характеристик отражения Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна, вероятно, будет проведено только в будущем при радиолокации этих планет в коротковолновой части сантиметрового диапазона ($\lambda=1-3$ см), где возможно получение отраженных сигналов за счет неоднородностей в верхней части атмосферы. Спектры радиотеплового излучения больших планет близки между собой и хорошо объясняются газовыми компонентами атмосферы

этих планет. Но свои возможности эти методы дистанционных исследований далеко еще не использовали полностью.

Строительство новых планетных радиолокаторов и радиотелескопов, оснащаемых более чувствительной аппаратурой, а также установка на существующие инструменты более чувствительной аппаратуры позволят исследовать более далекие объекты наблюдения, а также начать исследование нового класса объектов: спутников планет, малых планет и астероидов, к которым пока еще затруднен полет автоматических станций. В исследовании локальных характеристик поверхности и поверхностного слоя Марса и Венеры наземные радиофизические методы должны дать еще много информации ученым. Эта информация совместно с результатами дистанционных космических измерений, а также с данными непосредственных исследований существенно расширит наши знания об этих планетах, а также о закономерностях образования, существования и развития всей Солнечной системы.

Николай Николаевич Крупенио

РАДИОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛУНЫ И ПЛАНЕТ

Редактор *Е. Ю. Ермаков*
Обложка *В. И. Пантелеева*
Худож. редактор *В. Н. Конохов*
Техн. редактор *Т. Ф. Айдарханова*
Корректор *И. В. Сорокина*

А 03115. Индекс заказа 64204. Сдано в набор 19/1-1976 г. Подписано к печати 25/III-1976 г. Формат бумаги 84×108/32. Бумага типографская № 3. Бум. л. 1.0. Печ. л. 2.0. Усл. печ. л. 3.36. Уч.-изд. л. 3.48. Тираж 31 450 экз. Издательство «Знание». 101835, Москва, Центр, проезд Серова, д. 4. Заказ 126. Типография Всесоюзного общества «Знание». Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4.
Цена 11 коп.

Милосердие

11 коп.

Индекс 70101

