

Министерство высшего и среднего специального образования
Р С Ф С Р .

Ордена Трудового Красного Знамени
научно-исследовательский радиофизический институт (НИРФИ)

Препринт № 169

РАДИОНАБЛЮДЕНИЯ ПЛАНЕТ И СПУТНИКОВ

В.С.Троицкий

Горький 1989

УДК 523.164+621.396

В работе дается представление о характере развития радиоастрономических исследований в СССР Луны, планет и их спутников. Излагаются мотивы, логика и способы исследования, а также полученные результаты. Особенное внимание уделено истории радиоисследования Луны, которое продемонстрировало большие возможности и привело к созданию общих методов радиоисследования природы тел солнечной системы, широко используемых как для астрономических исследований планет и их спутников, так и для дистанционного изучения подстилающей поверхности Земли в практических целях.

Раздел посвящен истории исследований в нашей стране тел солнечной системы — планет и их спутников — методами радиоастрономии и радиофизики.

Работы велись в ряде научных центров страны, поэтому в начале коротко изложены направления исследований и основные наиболее выдающиеся результаты, полученные в этих научных центрах. Затем дается по возможности полное описание истории и результатов исследования различных планет и их спутников. Такая структура изложения приводит к некоторым повторениям, однако она лучше отражает организационную и научную стороны исследований.

Наибольшее внимание уделено методам и результатам исследований Луны, которые хронологически были лидирующими и, в известной мере, основополагающими для последующих радиофизических исследований поверхности планет и их спутников.

При изложении истории особое внимание обращалось на раскрытие мотивов и логики соответствующих исследований.

Начало радиоастрономических исследований в нашей стране следует отнести ко времени образования в 1946—47 годах по инициативе С.Э. Хайкина радиоастрономических групп. В физическом институте АН СССР (ФИАН) это была группа под руководством С.Э. Хайкина, а затем В.В. Виткевича, в Горьковском физико-техническом институте (ГИФТИ) при университете — под руководством Г.С. Горелика и директора ГИФТИ М.Т. Греховой.

Радиоастрономические исследования планет и их спутников в этих институтах начались с пятидесятых годов.

В Горьком исследования вел большой коллектив сотрудников под руководством В.С.Троицкого⁺).

В Физическом институте АН СССР исследованиями планет и спутников руководили А.Е.Саломонович и А.Д.Кузьмин.

В 1953 г. в ГАО АН СССР в Пулкове был организован отдел радиоастрономии и с начала 60-х годов там проводились планетные исследования под руководством С.Э.Хайкина и Ю.Н.Парийского, затем в 70-е годы исследования продолжались в Специальной Астрофизической Обсерватории АН СССР в отделе радиоастрономии под руководством Ю.Н.Парийского.

В институте радиотехники и Электроники (ИРЭ) АН СССР под руководством академика В.А.Котельникова с 60-х годов начались радиолокационные исследования Венеры, Марса, Меркурия.

Приведем кратко главные направления исследований в этих учреждениях и полученные наиболее важные и оригинальные результаты.

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ РАДИОФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ (НИРФИ)

Радиоастрономические исследования планет и их спутников начались здесь практически с 1952 г. с исследования Луны, сначала в ГИФТИ при Горьковском университете, Это были первые в СССР систематические радионаблюдения Луны, ставшие началом многолетнего цикла исследований собственного радионизлучения Луны в НИРФИ, которые проводились вплоть до 1967 г. и охватили широкий диапазон

⁺) До 1956 г. в ГИФТИ, затем в выделенном из ГИФТИ Научно-исследовательском радиофизическом институте (НИРФИ) Минвуза РСФСР.

волн от 0,087 до 70 см. Для исследования применялись небольшие радиотелескопы диаметром от 0,5 м для суб-миллиметровых и миллиметровых волн и до 12 м для дециметровых, что обеспечивало измерение полного (интегрального) радиоизлучения от всего диска Луны.

Работа проводилась под руководством В.С.Троицкого большим коллективом сотрудников, которые разрабатывали необходимые радиотелескопы, проводили наблюдения и их обработку. Наиболее существенный вклад внесли В.Д.Кротиков, А.Г.Кисляков, В.Л.Рахлин, М.Р.Зелинская, К.М.Стрежнева, В.А.Порфирьев, Л.И.Федосеев, В.М.Плечков, А.И.Наумов, В.А.Разин, Н.М.Цейтлин, В.Н.Никонов, а впоследствии и Т.В.Тихонова, С.А.Каменская, В.А.Алексеев, Л.Н.Бондарь, Ю.Г.Матвеев, Б.И.Семенов, С.А.Шмулевич, Г.Л.Сучкин, Т.Н.Алешина, О.Б.Щуко и др.

Главной и существенной особенностью этих исследований, отличавшей их от соответствующих зарубежных и отечественных, было применение предложенного и разработанного в НИРФИ точного метода абсолютных измерений радиоизлучения, получившего название "метод искусственной Луны". Для осуществления этого метода, позволившего на порядок увеличить точность измерения по сравнению с общепринятыми методами, была организована в Крыму в районе Кара-Дега специальная станция. В настоящее время на этой станции по методу искусственной Луны проводятся точные измерения радиоизлучения дискретных источников.

Другой отличительной особенностью было проведение комплексных исследований различными радиофизическими методами, подчиненными задаче определения теплового режима, физических свойств, структуры и природы вещества верхнего покрова Луны.

В соответствии с этим в НИРФИ были проведены широкие исследования электрических свойств земных горных пород, которые могли быть аналогами лунных. Были организованы специальные работы по изучению теплопроводности пористых тел в вакууме, поставленные в Ленинграде в Институте точной механики и оптики под руководством Г.Н.Дульнева и в Котлотурбинном институте (руководитель Р.Е.Кржижановский). Для интерпретации зарубеж-

ных радиолокационных измерений поперечника обратного рассеяния Луны ставились модельные исследования влияния шероховатости на величину поперечника в оптическом диапазоне. Была проведена наиболее полная разработка теории теплового радиоизлучения Луны как в зависимости от фаз, так и во время затмения. Решены задачи радиоизлучения и отражения радиоволн при плоско-слоистом неоднородном в глубину распределении свойств вещества верхнего покрова. Предложен ряд способов определения свойств вещества по спектральным и временным характеристикам собственного излучения Луны и т.п.

К 1967 году были получены по методу "искусственной луны" наиболее точные данные об интегральном радиоизлучении Луны (средней по диску радиотемпература), ее зависимости от фазы лунаций и затмения более чем на тридцати различных волнах в диапазоне от 0,087 до 70 см.

Весь комплекс экспериментальных и теоретических исследований позволил определить тепловой режим вещества верхнего покрова Луны, его электрические и тепловые параметры, структуру, плотность и зависимость ее от глубины под поверхностью вплоть до нескольких метров. Был обнаружен и определен поток тепла из недр Луны, оценены химический состав и микроструктура вещества. Все эти данные использовались при проектировании спускаемых на Луну аппаратов, а также проектировании ходовых частей "луноходов".

Полученные характеристики позднее были полностью подтверждены прямыми измерениями на Луне с помощью советских и американских автоматических и пилотируемых станций (см. таблицу сравнения). Это было лучшим доказательством правильности разработанной теории, методов измерений и интерпретации, т.е. всего комплекса исследований Луны в СССР.

Описанный цикл работ НИРФИ был отмечен присуждением В.С.Троицкому премии им. А.С.Попова в 1974 г., а обнаружение роста температуры вглубь Луны; свидетельствующее о существовании у нее горячих недр, дипломом на открытие, выданным в 1967 г. В.С.Троицкому и В.Д.Кротикову.

Разработанные и апробированные на примере Луны методы определения свойств вещества поверхности по её радиоизлучению и отражению радиоволн были распространены на планеты земной группы: Венеру, Марс, Меркурий. Для интерпретации накопившихся данных измерений разработана теория теплового радиоизлучения поверхности этих планет с учетом специфики их нагрева и наблюдений. В результате были получены впервые некоторые данные о свойствах вещества планет земной группы.

Исследования планет подобными методами продолжают и в настоящее время, в восьмидесятые годы.

ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ АН СССР ИМ. ЛЕБЕДЕВА (Ф И А Н С С С Р)

Работы ФИАНа в области исследования планет и их спутников начались в 1952 г. с исследования Луны. Работы велись небольшим коллективом; основной вклад внесли А.Е.Саломонович, А.Д.Кузьмин, Б.Я.Лосовский, Ю.Н.Ветуховская и др. В 1956 г. впервые был определен фазовый ход интегрального радиоизлучения Луны в 8-миллиметровом диапазоне волн. Существенной особенностью и новым вкладом в последующие исследования Луны в ФИАНе было измерение ее радиоизлучения с высокой угловой разрешающей силой, что позволило обследовать радиоизлучение деталей лунной поверхности и хорошо дополнило исследования интегрального радиоизлучения в НИРФИ.

Радионаблюдения Луны с высоким разрешением стали возможными благодаря сооружению в 1959 г. на радиоастрономической станции ФИАН в Пушкине на Оке самого большого в стране и в то время самого точного в мире полноповоротного радиотелескопа диаметром 22 метра, позволившего вести измерения в миллиметровом диапазоне волн.

В результате были получены первые в мире двумерные радиояркостные карты Луны в сантиметровом и мил-

лиметровом диапазоне волн. Они дали возможность определить диэлектрическую постоянную породы, подтвердив значения, полученные ранее другими методами из интегральных измерений.

Большой радиотелескоп ФИАН позволил уже в 1959 г. начать первые в нашей стране измерения радиоизлучения планет. В качестве первого объекта исследования была выбрана планета Венера. Сведения о ней в то время из-за оптической непрозрачности ее облачного слоя были весьма скудными. Затем в период с 1960 по 1975 гг. было зарегистрировано и измерено радиоизлучение Меркурия, Марса, Юпитера, Сатурна, Урана, Нептуна на миллиметровых и сантиметровых волнах. Некоторые из этих исследований велись в кооперации и при участии НИРФИ и ИРЭ АН СССР.

Наиболее обширные и важные результаты радионаблюдений планет получены в ФИАНе при исследовании Венеры. В результате установлено существование у нее высокой температуры поверхности под слоем мощной атмосферы. Эти данные, дополненные позднее новыми измерениями, легли в основу проектирования аппаратов, спускаемых на поверхность Венеры.

ГЛАВНАЯ АСТРОНОМИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ АН СССР (Г А О А Н С С С Р)

Работы Пулковской обсерватории АН СССР по исследованию планет и спутников были начаты в шестидесятых годах под руководством С.Э.Хайкина и Ю.Н.Парийского. Существенный вклад в радионаблюдения внесли Н.С.Соболева, М.М.Кайдановский, В.А.Корольков и др. Особенно — стью этих исследований является использование рекордно высокой разрешающей силы, получаемой на сантиметровых волнах по одной координате на специально разработанной меридианной антенне. Антенна размером 2х190 м была построена в весьма короткий срок и введена в строй в

1956 г. Радиотелескоп с этой антенной, названный антенной переменного профиля (АПП), мог работать в диапазоне сантиметровых волн и обеспечивал в то время наивысшую в мире разрешающую способность по азимуту (ножевая диаграмма). Наиболее адекватным применением такого радиотелескопа является исследование распределения радиояркости источников и поляризации радиоизлучения. На этом радиотелескопе в Пулковской обсерватории были впервые проведены поляризационные исследования радиоизлучения Луны на сантиметровых волнах, что позволило значительно уточнить данные о диэлектрической постоянной вещества ее поверхности.

В ГАО проведены были уникальные исследования распределения радиояркости по диску Венеры, позволившие сделать весьма вероятный вывод о высокой температуре поверхности и большом давлении атмосферы Венеры.

Высокая разрешающая сила радиотелескопа позволила обнаружить и обследовать радиоизлучение поясов радиации Юпитера.

Исследования планет и спутников велись в Пулкове до начала 70-х годов, затем были продолжены в Специальной Астрофизической Обсерватории на Северном Кавказе около станции Зеленчукская Ставропольского края.

СПЕЦИАЛЬНАЯ АСТРОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ АН СССР

(С А О А Н С С С Р)

В середине 70-х годов в станице Зеленчукская Академии наук СССР под научным руководством Ю.Н.Парийского на основании опыта использования Пулковского АПП была сооружена гигантская антенна переменного профиля РАТАН-600 и образован отдел радиоастрономии специальной астрофизической обсерватории (САО АН СССР). Радиотелескоп РАТАН-600 представляет собой ленточное коль-

цо диаметром 600 м и высотой 7 м, состоящее из 1000 отражающих элементов. Кольцевая форма позволяет иметь четыре антенны размерами 7х400 м с независимым направлением лучей: восток, запад, север, юг. Эта антенна обеспечивает самую высокую в мире разрешающую силу одиночного радиотелескопа по азимутальной координате при достаточно высокой площади приема.

С 1973 г. в САО начали проводиться исследования Луны и планет. Здесь используются возможности высокой разрешающей силы радиотелескопа, который к настоящему времени работает в диапазоне от миллиметровых до дециметровых длин волн включительно.

Высокое разрешение позволило впервые в мире измерить радиозлучение некоторых спутников Юпитера, а также оригинальным способом подтвердить ранее полученный в НИРФИ рост температуры в глубину под поверхность Луны. Радионаблюдения Луны, планет и их спутников с высоким разрешением продолжаются в САО АН СССР в настоящее время. На основе высокого разрешения РАТАН-600 в САО развивается новое направление исследований — радиоастрометрия.

КРЫМСКАЯ АСТРОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ АН СССР (КАО АН СССР)

Перечень институтов, работавших в области радионаблюдений Луны и планет, был бы не полным, если не упомянуть, что ряд измерений Луны и планет выполнялся, начиная с конца 60-х годов, на миллиметровых волнах на радиотелескопе РТ-22 в Крымской Астрофизической обсерватории АН СССР (КАО) совместно с НИРФИ под руководством И.Г.Моисеева, А.Г.Кислякова и В.Н.Ефанова.

В ИРЭ АН СССР в 1961 г. под руководством акад. В.А.Котельникова начались первые в нашей стране радиолокационные исследования планет. Была существенно уточнена астрономическая постоянная, получены более точные кинематические и дистанционные характеристики в движении Венеры, а также некоторые данные о рельефе ее поверхности.

За эти работы В.А.Котельникову с коллективом исполнителей присуждена в 1964 г. Ленинская премия.

В настоящее время радиолокационные исследования продолжаются с использованием радиолокатора, имеющего существенно больший потенциал. Исследования распространены на другие ближайšie к Земле планеты - Марс, Меркурий.

РАДИОИССЛЕДОВАНИЯ ЛУНЫ

1. Теория и измерения радиоизлучения Луны

Радиоизлучение Луны впервые было измерено за рубежом на волне 1,25 см (Пиддингтон и Миннет, 1949). В этой работе измерялась средняя по диску Луны яркостная температура и ее изменение в течение всего лунного цикла. Как и следовало ожидать, яркостная температура на этой волне менялась со временем в соответствии с фазами Луны. Изменения происходили практически синусоидально около некоторой средней величины, причем максимум излучения запаздывал относительно максимума нагрева (наступал позднее полнолуния). Амплитуда колебания радиояркостной температуры составляла примерно пятую часть от амплитуды колебания температуры на инфракрасных вол-

как. Этот эффект был естественно объяснен тем, что радиоизлучение обусловлено толстым слоем вещества, т.е. идет преимущественно из некоторой глубины, в которой температурные колебания существенно слабее, чем на поверхности. Толщина излучающего слоя, как очевидно, соответствует оптической толщине, равной единице. В работе на основе этого была дана теория теплового радиоизлучения Луны в предположении диэлектрической природы ее вещества для однородной и резко неоднородной двухслойно-пылевой модели строения верхнего покрова. Согласно этой теории, степень уменьшения колебаний радиояркости определяется соотношением глубины l (проникновения электромагнитной волны) к глубине l_T (проникновения температурной волны в среду), т.е. величиной $\delta = l/l_T$.

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

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

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

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

Впервые радиоизлучение Луны наблюдалось у нас в стране осенью 1951 г. на 4-метровом радиотелескопе на волне $\lambda = 3,2$ см С.Э.Хайкиным и Н.Л.Кайдановским в ФИАНе.

Первые систематические измерения радиоизлучения Луны в СССР в течение ряда лунных циклов были проведены в Горьком на радиоастрономической станции "Зименки" на волне 3,2 см в 1952 г. Отдельные измерения на этой же волне примерно в этот же период выполнялись в ФИАНе (Кайданозский Н.Л., Турусбеков М.Т., Хайкин С.Э., 1956). В Горьком измерения проводились на радиотелескопе с диаметром параболической антенны 4 метра, установленной на азимутально-угломестном поворотном устройстве. Чувствительность радиотелескопа была достаточно высокой, позволяя обнаружить относительные изменения температуры Луны в 2-3°К, однако точность абсолютных измерений из-за влияния трудно учитываемых изменений погоды и состояния антенны была существенно хуже. Измерения показали, что колебания интегральной яркостной температуры на этой волне в течение лунного цикла существенно меньше, чем на волне 1,25 см (Троицкий В.С., Зелинская М.Р., 1955). Это указывало на то, что за излучение на более длинной волне ответственен более толстый слой вещества или, иначе говоря, глубина проникновения волны 3,2 см существенно больше, чем волны 1,25 см. Это был важный результат с далеко идущими следствиями.

Для дальнейших исследований требовалась разработка более полной теории, в особенности разработка теории интегрального радиоизлучения, что было необходимо для сравнения с опытом; требовался учет и ряда других факторов. В соответствии с этим разработана была более адекватная теория радиоизлучения Луны для однородной модели свойств вещества верхнего покрова по поверхности и в глубину (Троицкий В.С., 1964), которая учитывала распределение излучательной способности по диску Луны; а также с известным приближением давалась теория интегрального излучения и влияния шероховатости. Было впервые обращено внимание на существование поляризации радиоизлучения и его распределения по диску Луны, а также поляризации интегрального радиоизлучения, получающегося за счет неравномерного нагрева поверхности Луны. Позднее, с использованием ЭВМ, была дана достаточно точная теория интегрального радиоизлучения Луны (Кротиков В.Д., 1969, 1965) и его поляризации (Алексеев В.А., Кротиков В.Д.,

1968, 1969), а также влияния шероховатости на интенсивность и поляризацию излучения (Алексеев В.А., Алешина Т.Н., Кротиков В.Д., Троицкий В.С., 1967).

Теория теплового радиоизлучения Луны рассматривалась для случая однородного слоя при предположении независимости свойств его вещества от температуры. Сначала решалось уравнение теплопроводности для плоского элемента лунной поверхности при заданном изменении инсоляции в течение лунного цикла. Вследствие периодичности нагрева каждое значение температуры поверхности с географической широтой ψ и долготой φ могло быть представлено в виде гармонического ряда. Далее, полученная температура принималась за граничное условие и решалась задача распространения периодического нагрева внутрь слоя Луны, находилось поле температур в глубину. Наконец, из уравнения переноса определялось радиоизлучение, выходящее наружу. В результате получается довольно простое выражение для распределения радиояркой температуры по диску Луны в виде

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

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

Амплитуды колебаний радиояркости для гармоник выше первой на волнах, длиннее субмиллиметровых, составляют сравнительно небольшую часть первой гармоники и обычно не рассматриваются. Как видно из (1), при $\delta \rightarrow \infty$

запаздывание максимума радиоизлучения стремится к 45° ($\xi \rightarrow 45$), а амплитуда переменной составляющей стремится к нулю. Физически это вполне очевидно. Чем больше толщина радиоизлучающего слоя, тем меньшая доля излучения идет от его части l_T , где имеют место температурные колебания.

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

Как уже говорилось, для сравнения с опытом необходимо было иметь выражение для интегральной радиояркости. При этом, как показали расчеты (см., например, обзор Кротиков В.Д., Троицкий В.С. 1963), интегральная яркостная температура получает простой вид:

$$T(t) = (1 - R_1) T_0(0) \beta_0(\epsilon) + (1 - R_1) \frac{T_1(0) \beta_1(\epsilon, \delta)}{\sqrt{1 + 2\delta + 2\delta^2}} \cos(\Omega t - \xi), \quad (2)$$

где ξ - сдвиг фазы первой гармоники для центра диска, ϵ - диэлектрическая постоянная лунного вещества, $R_1 = (\sqrt{\epsilon} - 1)^2 / (\sqrt{\epsilon} + 1)^2$ - коэффициент отражения при перпендикулярном падении волн, $\beta_0(\epsilon)$ и $\beta_1(\epsilon, \delta)$ - рассчитанные с помощью ЭВМ коэффициенты усреднения, близкие к единице и слабо зависящие от ϵ и δ . Для второй и высших гармоник коэффициенты усреднения резко падают. Уже вторая гармоника только за счет усреднения оказывается ослабленной в 3 раза по сравнению с первой, поэтому в выражении (2) более высокие гармоники отброшены.

Таким образом, фазовая зависимость интегрального радиоизлучения Луны оказывается практически синусоидальной. Как видно из выражения (2), зная отношение амплитуды переменной составляющей к постоянной, можно найти величину $\delta = l/l_T$, т.е. комбинацию электрических и тепловых параметров; то же самое, но менее точно определяется по запаздыванию фазы. Очевидно, что δ зависит от длины волны λ принимаемого излучения.

В 1956-58 гг. в ФИАНе впервые были проведены систематические исследования фазового хода радиоизлучения Луны в миллиметровом диапазоне волн. На волне 8 мм с помощью радиотелескопа диаметром 2 метра был обнаружен и измерен фазовый ход яркостной температуры Луны, усредненной по большей части ее диска. Было замечено также присутствие второй гармоники (Саломонович А.Е., 1958).

В 1956-57 гг. в НИРФИ на полигоне "Зименки" были проведены измерения фазовой зависимости радиоизлучения Луны на волне 1,63 см на радиотелескопе диаметром 4 метра (Зелинская М.Р., Троицкий В.С., Федосеев Л.И., 1959). В этой работе при сопоставлении данных отечественных и зарубежных измерений на волнах 3,2 ; 1,6 ; 1,25 ; 0,8 см была установлена важная закономерность. Она состоит в том, что отношение $\delta/\lambda = \pi$ оказывалось независящим от длины волны. Отсюда вытекала пропорциональность глубины проникания электромагнитных колебаний длине волны $l = \lambda \pi l_r$. Это важный результат, указывающий на то, что материал Луны - диэлектрик, как это и было принято при разработке теории радиоизлучения Луны. Более того, как мы увидим ниже, это соотношение раскрывает природу вещества верхнего покрова Луны.

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

Таким образом, по инфракрасным измерениям определяется некоторый параметр $\gamma = (k\rho c)^{-1/2}$, характеризующий тепловую инерцию. Здесь k - теплопроводность, ρ - объемный вес, c - теплоемкость вещества поверхности. Первые такие расчеты и определения γ были сделаны еще в 1953 г. (Ягер, 1953). Однако они нуждались в серьезной ревизии. Поэтому в НИРФИ были выполнены новые расчеты значений температуры поверхности с использованием современных возможностей счета на ЭВМ. Для определения γ использованы результаты новых измерений излучения Луны в инфракрасной области (Кротиков В.Д., Щуко О.Б., 1963).

Наиболее эффективно γ определяется по температу-

ре поверхности в лунную полночь (новолуние). Однако измерени этой весьма низкой температуры сильно затруднено и полученные в то время ее значения давали слишком широкие пределы возможных значений χ . Требовалось проведение наблюдений в течение всего лунного цикла, которые не удалось стимулировать где-либо. В связи с этим в НИРФИ был разработан телескоп на инфракрасных волнах, на котором были проведены систематические наблюдения за интегральным излучением Луны практически в течение всего цикла и получены данные о величине χ , которые согласовывались с данными, полученными из радионаблюдений (Рядов В.Я., Фурашов Н.И., Шаронов Г.А., 1964).

В НИРФИ был предложен и использован способ измерения χ , основанный на определении отношения амплитуды первой гармоники поверхностной температуры T_1 к постоянной составляющей T_0 , которое получалось экстраполяцией отношения амплитуды первой гармоники к постоянной составляющей радиотемпературы, измеренных на ряде волн. Как видно из (2), отношение амплитуды переменной части к постоянной $T_{1\lambda}/T_{0\lambda}$ при $\lambda \rightarrow 0$ дает искомое значение T_1/T_0 . Другой способ состоял в определении χ по самой величине T_0 , полученной из точных радионазмерений постоянной составляющей. Однако здесь требовалось знание диэлектрической постоянной верхнего покрова.

Определение χ по отношению T_1/T_0 из радионазмерений имеет то преимущество, что не требует точных абсолютных измерений, т.к. получается из отношения двух величин, измеренных одновременно в одинаковых условиях.

К концу 50-х годов стало ясно, что для дальнейшего уточнения свойств вещества верхнего покрова необходимо существенно увеличить точность измерений и провести их в широком диапазоне волн, начиная от миллиметровых (Троицкий В.С., 1956). Поиски точных методов измерений радиоизлучения Луны привели к идее использования эталонного сигнала для точной калибровки параметров антенны, неопределенность и непостоянство которых вносят главную ошибку в измерения.

В начале эталонный сигнал составлялся из разности между излучением металлического диска, выложенного на склоне горы, и излучением соседнего с ним участка горы,

покрытого поглощающим материалом (Троицкий В.С., Цейтлин Н.М., 1961). Металлический диск имел угловые размеры, равные лунным, был наклонен на 45° к горизонту, отражая известное с большой точностью радиоизлучение зенита. Однако яркостная температура диска определялась еще и дифракцией на нем окружающего фона излучения гористой местности. Неточность знания дифракции приводила к систематической ошибке. Хотя этот метод, как выяснилось, не позволял вести точные абсолютные измерения из-за неучитываемого влияния дифракции, он обеспечивал более высокую стабильность получаемых результатов, что позволяло точно измерить слабый фазовый ход радиоизлучения на сантиметровых волнах. В результате измерений был впервые обнаружен и измерен фазовый ход радиоизлучения на волне 3,2 см (Стрежнева К.М., Троицкий В.С., 1961).

Вместе с продвижением измерений в длинноволновую область была очевидна необходимость измерений радиоизлучения на коротких миллиметровых волнах, дающих сведения о самом верхнем слое вещества. Эксперимент на миллиметровых волнах считался поэтому решающим для определения модели строения покрова — однородная она или резко неоднородная, как это получалось в работе Пиддингтона и Миннета. В связи с этим к 1959 г. в НИРФИ был разработан первый в мире радиотелескоп на самую короткую тогда волну $\lambda = 4$ мм, а в 1960 г. в высокогорной экспедиции на Эльбрусе были проведены первые измерения радиоизлучения Луны на этой волне, зондирующие еще более верхнюю часть покрова, чем прежде (Кисляков А.Г., 1961). Позднее для исследования самого верхнего слоя вещества была создана серия уникальных радиотелескопов на целый ряд волн, короче четырех миллиметров, включая и субмиллиметровые волны. На этих радиотелескопах впервые были проведены исследования радиоизлучения Луны на волне 0,18 см (Наумов А.И., 1963), на волне 0,13 см (Федосеев Л.И., 1963). Исследования выполнялись в высокогорном районе Восточного Памира на высоте 3860 метров над уровнем моря, что исключало существенную часть влияния поглощения этих волн в атмосфере Земли.

Наконец, в 1967 г. были выполнены впервые в мире измерения фазового хода радиоизлучения Луны в субмилли-

метровом диапазоне на волне 0,087 см (Федосеев Л.И., Лубяко Л.В., Кукин Л.М., 1968).

Измерения фазового хода радиоизлучения в широком диапазоне волн стали решающими для определения модели. На основании всех относительных измерений на волнах 0,4; 0,8; 1,25; 1,68; 3,2 см к 1961 г. было показано, что верхний слой породы Луны достаточно однороден в глубину, по крайней мере, до глубины порядка полуметра. Резко неоднородное двухслойно-пылевое строение было исключено (Троицкий В.С., 1961). Эти измерения позволили подтвердить справедливость соотношения $\delta = m\lambda$ для всего рассмотренного диапазона волн и определить значение $m \approx 2.2 \text{ см}^{-1}$. Отсюда получается

$$l = 2,2 \lambda l_T . \quad (3)$$

Характер спектра l соответствует спектру силикатных вулканических пород, что вместе с другими соображениями, вытекающими из общих представлений о составе планетных тел, может считаться доказательством тождественности химического и минералогического состава вещества верхнего покрова Луны с земными силикатными вулканическими породами. Если это так, то с достаточно большой точностью для всех пород теплоемкость $C = 0,2 \text{ кал} \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{град}^{-1}$. Подставляя в (3) известные выражения для l и l_T при $C = 0,2$, получим экспериментальное значение комбинаций четырех параметров.

$$\chi \rho / \sqrt{\varepsilon} \operatorname{tg} \Delta = 6,23 \cdot 10^4 . \quad (4)$$

Величина χ определяется из независимых радио и инфракрасных измерений, которые приводят к значению $\chi \approx 700-800$. Таким образом, остаются еще 3 неизвестных: ε , $\operatorname{tg} \Delta$ и ρ .

В ряде зарубежных работ на основании предполагаемой тождественности химического состава земных и лунных пород делались попытки определить ρ , подставляя в формулу (4) значения ε и $\operatorname{tg} \Delta$ для земных горных пород.

Однако это принципиально ошибочно, т.к. ϵ и $\operatorname{tg} \Delta$ зависят не только от минералогического состава, но, главным образом, еще и от самой плотности. Интуитивно было ясно, что величина $\rho^{-1} \operatorname{tg} \Delta = \epsilon$ не должна зависеть от ρ , а только от химсостава, по крайней мере, при ρ , меньшем чем плотность кристаллического (непористого) состояния ρ_0 . Именно малая плотность должна иметь место на Луне. На это указывало высокое значение $\gamma \approx 10^3$ — во много раз большее значения для плотных непористых пород, равного $\gamma \approx 20 - 50$.

Для исследования указанного вопроса в НИРФИ были организованы и проведены обширные измерения на волне 3,2 см угла потерь у различных пород, взятых из музеев (Кротиков В.Д., 1962). Путем дробления и прессовки достигались различные плотности в интервале $0,5 \leq \rho \leq 1,25$. В результате было показано, что в среднем для земных пород $\rho^{-1} \operatorname{tg} \Delta = (10 \pm 3) \times 10^{-3}$. Считая, что для лунных пород в первом приближении в среднем, имеет место то же значение $\rho^{-1} \operatorname{tg} \Delta$, подставляя которое в (4), получим $\epsilon \approx 1,5$, чему, как будет показано ниже, соответствует $\rho \approx 0,5 \text{ г см}^{-3}$. Столь малая плотность может иметь место только для твердо-пористого вещества, и, широко распространенная за рубежом гипотеза о сплошном пылевом покрове Луны не подтверждается (Троицкий В.С., 1961, 1962). Это практически все, что могли дать относительные измерения. Дальнейшее продвижение в исследовании верхнего покрова было возможно только с применением существенно более точных методов измерения слабого радионезлучения.

2. Точные измерения радионезлучения.

Разработка методов определения свойств вещества Луны.

Новые результаты были получены с применением прецизионного метода измерения радионезлучения, разработанного в НИРФИ (Кротиков В.Д., Порфирьев В.А., Троицкий В.С., 1961). Метод основан на сравнении радионезлучения Луны с точно известным радионезлучением абсолютно чер-

ного диска, помещенного во френгоферовой зоне антенны радиотелескопа на достаточной высоте над горизонтом. Способ получил название "метод искусственной Луны", так как обычно диск имеет видимые от радиотелескопа угловые размеры, близкие к угловым размерам Луны. Эталонный сигнал образовывался, когда диск вносился и убирался из поля зрения неподвижного радиотелескопа (из главного лепестка диаграммы антенны).

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

Для исключения влияния дифракции применили второй эталон - отверстие в плоскости, перекрывающей главный лепесток диаграммы антенны, расположенное там же, где и диск. По размерам отверстие должно точно соответствовать диску. В этом случае эталонный сигнал, образованный излучением черного диска, помещаемого в отверстие, оказывается уменьшенным на величину мощности дифрагированного в отверстии радиоизлучения Земли. В первом замере диск в свободном пространстве "ташил" с собой дополнительный дифракционный сигнал, во втором замере диск, закрывая отверстие, убирал дифракционный сигнал, уменьшая эффект радиоизлучения диска на эту величину. Таким образом, в первом замере дифракционный сигнал добавлялся к эталонному сигналу, а во втором - наоборот от эталонного излучения вычитался. Поскольку дифракционные картины диска и отверстия одинаковы (дополнительные экраны, принцип Бабиня), то дифрагированные мощности будут равны по величине. Следовательно, среднее значение сигналов от свободного диска и диска в отверстии будут строго равны известному излучению диска.

Позже, благодаря применению второго эталона, дифракционные ошибки были детально исследованы и найдены условия установки диска, при которых неточность теорети-

ческого учета дифракционной ошибки была в допустимых пределах (Цейтлин Н.М., 1963), (Тихонова Т.В., 1969). Это дало возможность пользоваться в дальнейшем только одним эталонным диском. Размеры диска в первых измерениях, проводившихся в Крыму на волне 3,2 см, были 60 и 120 см, а затем - 4-5 м. Первая система с диском 60 см и отверстием в черной плоскости, была установлена в Ялте на крыше гостиницы "Ореанда". Там же были проведены первые точные измерения интегральной радиотемпературы на волне 3,2 с радиотелескопом диаметром 1,5 м. Затем был установлен радиотелескоп диаметром 4 м с искусственной Луной на горе возле развалин генуэзской крепости в Судаке - такая же установка сооружена на Кара-Даге, где использовалась 5-метровая искусственная Луна и радиотелескоп диаметром 8 и 12 м.

В результате применения нового метода оказалось возможным определять температуру Луны с точностью 1-2% в широком диапазоне волн. Ограничение метода состоит в трудности его применения для измерений, при которых фраунгоферова зона $r = 2D^2 \lambda^{-1}$ слишком далека (большие антенны или миллиметровые волны при умеренных антеннах). Это требует больших дисков, устанавливаемых на больших высотах над землей, что практически неосуществимо. В дальнейшем, однако, метод был распространен и обоснован для установки дисков в ближней френелевской зоне дифракции антенны, что сильно расширяет возможности и в значительной степени снижает указанные выше ограничения (Цейтлин Н.М., 1964).

Уже в 1961-1962 гг. проведенные в НИРФИ на основании метода искусственной Луны измерения на волнах 0,4; 1,6; 3,2; 10 и 35 см показали систематический рост интегральной радиотемпературы от 205 до 237°K с увеличением длины волны. Этот рост соответствовал изменению температуры соответственно от глубины 0,5 до 5-6 м, что являлось однозначным свидетельством существования потока тепла из недр Луны. Приповерхностный градиент температуры оказался около 2-3 град/метр, чему соответствует поток тепла из недр при 10^{-6} кал·см⁻²·с⁻¹ (Кротиков В.Д., Троицкий В.С., 1963).

В период с 1961 по 1967 г. вслед за первыми успеш-

ными измерениями радиотемпературы, с высокой точностью, позволившими обнаружить и определить поток тепла из недр, а также ряд новых параметров вещества Луны (ϵ, ρ), последовала целая серия измерений радиоизлучения Луны по методу искусственной Луны в широком интервале спектра волн — от 0,087 до 60 см, проводившихся, в основном, на Карадагской станции и в ряде специальных экспедиций (Памир, Арагац, Уссурийск и др.). Наиболее полно эти результаты, вместе с имеющимися мировыми экспериментальными данными, приведены в ряде обзоров (Troitsky V.S., 1965), (Троицкий В.С., 1967), (Троицкий В.С., Тихонова Т.В., 1970).

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

Наибольший интерес представляло измерение плотности верхних слоев лунного вещества, которая не определялась существовавшими до этого методами. Однако представлялось очевидным, что она не равна плотности кристаллического состояния. Было обращено внимание на то, что измерение диэлектрической проницаемости верхнего слоя пород Луны в радиодиапазоне представляет особый интерес, давая возможность определения плотности вещества верхнего покрова. Последнее основывается на том соображении, что для пористой среды диэлектрическая постоянная ϵ является функцией $\epsilon(\rho, \epsilon_0)$, и, главным образом, степени пористого материала $\rho = 1 - \rho/\rho_k$, где ρ — объемный вес рассматриваемого пористого вещества, а ρ_k — объемный вес непористого кристаллического состояния. Значение диэлектрической постоянной ϵ_0 для плотной фазы влияет на ϵ существенно слабее. Поскольку мы определили, что лунные породы состоят из вулканических пород, аналогичных земным, то ϵ_0 может быть взята из данных для земных пород на сантиметровых волнах. Эта величина довольно слабо меняется в зависимости от пород и поэтому может считаться известной с достаточной точностью. Измеряя ϵ и зная ϵ_0 и ρ_0 , можно найти ρ и отсюда дать характеристику состояния вещества поверхности (сыпучая,

твердопористая).

Существует ряд теоретических соотношений между диэлектрической постоянной смесей и свойств, составляющих смесь вещества, в том числе для твердопористых и дисперсных материалов. Однако оказалось, что формулы разных авторов для случая материалов, составленных из земных силикатов, дают существенно разные результаты.

В связи с этим была поставлена большая экспериментальная работа по изучению зависимости ϵ и $\text{tg} \Delta$ от объемного веса (пористости) и типа породы в диапазоне от сантиметровых до метровых волн. Были исследованы многие десятки различных вулканических и осадочных пород; встречающихся на Земле. В первой же работе (Кротиков В.Д., 1962) было экспериментально показано, что диэлектрическая постоянная в диапазоне сантиметровых волн хорошо определяется формулой

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

где в среднем для всех пород с точностью до + 10% величина $a = 0,5$. Величина $b = \rho^{-1} \text{tg} \Delta$ оказалась, как это и ожидали, довольно сильно зависящей от химического состава породы.

Эмпирическая формула для ϵ в силу простоты и достаточной точности, а также частоты применяемости в исследованиях планет и Земли теперь уже вошла в научную литературу как формула Кротикова - ее автора. Дальнейшие исследования показали, что для кислых пород формула справедлива во всем наблюдаемом для них интервале плотностей, а для основных - до $\rho \approx 2 \text{ г. см}^{-3}$ (Шмулевич С.А., Троицкий В.С., 1971).

Наиболее обширные исследования проводились по изучению зависимостей $b = \rho^{-1} \text{tg} \Delta$ и $a = \rho^{-1}(\sqrt{\epsilon} - 1)$ от химического состава пород. Неожиданно оказалось, что эти величины зависят, в основном, только от содержания SiO_2 в породе. Если обозначить X - содержание SiO_2 в процентах, то оказывается, что $b = 960 X^{-2,85}$ для интрузивных пород и $1,8 \cdot 10^4 X^{-3,5}$ для эффузивных, а величина $\rho^{-1}(\sqrt{\epsilon} - 1) = 40/X$ для обоих типов пород (Шмулевич С.А., Троицкий В.С., Зелинская М.Р., и др., 1971)

Найденные зависимости параметров b и d от содержания SiO_2 пород получили название вариационных диаграмм диэлектрико-химических свойств (Бондарь Л.Н., Зелинская М.Р., Стрженева К.М., Троицкий В.С., 1969). Название взято по аналогии с устаиваемыми в минералогии вариационными диаграммами химсостава пород, демонстрирующими зависимость процентного содержания различных окислов в породах от содержания главного окисла - SiO_2 . Полученные зависимости говорят о том, что данный процент SiO_2 в породе задает вполне определенный состав других окислов, и нет в природе пород, в которых SiO_2 и другие окислы находятся в случайном произвольном соотношении концентраций.

Это позволяет использовать вариационные диаграммы для определения по известной для Луны величине b химсостава ее пород. При этом, как очевидно, поскольку b является средним по диску, можно получить некоторый средний преимущественный химсостав пород. В результате такого определения получено хорошее согласие найденного состава с имевшимися в то время данными о химсоставе, полученном автоматической станцией "Сорвейер" (Троицкий В.С., Бондарь Л.Н. и др., 1970). Теоретико-минералогический аспект вариационных диаграмм физических свойств рассмотрен позднее (Троицкий В.С., Бондарь Л.Н., Стрженева К.М., 1973).

Независимые сведения об ϵ можно получить, наблюдая ряд эффектов радиоизлучения. Была показана (Троицкий В.С., 1954) возможность определения ϵ по характеру распределения радиояркости по диску Луны. Из той же работы вытекала и возможность измерения ϵ по поляризации радиоизлучения различных участков Луны, которая детально разрабатывалась позднее (Троицкий В.С., Цейтлин Н.М., 1960).

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

масштабной шероховатости ее поверхности (Соболева Н.С., 1962).

Определение ϵ по характеру распределения радиояркости по диску Луны было получено на 22-метровом радиотелескопе ФИАН с высокой разрешающей силой. Впервые были выполнены измерения распределения радиояркости на волне 0,8 см и определен интервал возможного значения диэлектрической постоянной (Саломонович А.Е., Лосовский Б.Я., 1962).

В НИРФИ был предложен и разработан целый ряд других методов измерения ϵ . Так предложен метод измерения ϵ , основанный на определении запаздывания фазы радиоизлучения с участков диска, расположенных на разных долготах φ вдоль по экватору Луны, по сравнению с фазой солнечного нагрева для того же места (Троицкий В.С., 1961). Если $\epsilon \approx 1$, то при любой долготе излучение идет примерно с глубины $\frac{1}{2} \cos \varphi$. Около самого лимба ($\varphi \sim 90^\circ$) глубина мала и запаздывание фазы будет значительно меньше, чем в центре лимба. В случае же $\epsilon \gg 1$ из-за сильного преломления волн разница в глубинах для центра и лимба будет мала, и отставание радиоизлучения для центра и лимба будет примерно одинаковым. Наиболее подходящим диапазоном волн для таких измерений являются миллиметровые волны, для которых сдвиги фаз не очень велики.

Заметим, что все указанные методы осуществимы только лишь с большими антеннами, дающими высокое угловое разрешение, исчисляемое минугами. Кроме того, эти способы подвержены сильному влиянию шероховатости поверхности Луны, что особенно проявляется вблизи лимба, где такие измерения как раз и должны проводиться. Поэтому для возможности точной интерпретации подобных измерений, которые проводились, например, в ФИАН и ГАО АН СССР, была поставлена теоретическая работа, позволяющая получить количественные данные о характере влияния шероховатостей при различных типах измерений. Рассмотрены были теоретически поляризационные характеристики радиоизлучения Луны при учете шероховатости и усредняющем действии диаграммы направленности ножевого типа (Алексеев В.А., Кротиков В.Д., 1969). Теория показала, что измерение поляризации в центральной части дис-

ка Луны $r/r_{\text{л}} \approx 0,6$ позволяет найти диэлектрическую постоянную слоя Луны. Влияние шероховатости проявляется лишь вблизи лимба, что дает возможность, предварительно определив ϵ , оценить степень шероховатости лунной поверхности по значению поляризации вблизи лимба.

Наиболее доступно определение ϵ по разнице измеренной средней яркостной температуры на радио- и инфракрасных волнах, причем на инфракрасных волнах поверхность Луны может считаться абсолютно черной. Разница между этими температурами зависит от величины средней излучательной способности $(1 - R)$, где R — коэффициент отражения Френеля для радиоволн, который зависит от ϵ . Однако точных измерений постоянной составляющей яркостной температуры на инфракрасных волнах нам сделать не удалось, как впрочем, не удалось это и зарубежным исследователям. Поэтому эта температура находилась расчетом, по известному значению величины γ , которая была получена нами ранее. Используя точные измерения средней по диску постоянной составляющей радиотемпературы, полученные по методу искусственной Луны на $\lambda = 3,2$ см, равной 210°K , и сравнивая ее с расчетными значениями интегральной радиояркости для разных ϵ , при заданном γ , было получено, что $1,2 \approx \epsilon \approx 1,7$ и, следовательно, по формуле Кротикова $0,2 \approx \rho \approx 0,8 \text{ г. см}^{-3}$ (Кротиков В.Д., Троицкий В.С., 1962). Заметим что весь эффект изменения радиотемпературы за счет нечироты Лун в радиодиапазоне составил всего 8° , что, тем не менее, было достаточно надежно измерено по методу "искусственной луны".

Эти измерения ϵ , а также упомянутые выше определения ϵ по распределению радиояркости и особенно по поляризации позволили получить наиболее точное значение диэлектрической постоянной лунной породы. Кроме того, был предложен и применен метод непосредственного определения плотности пород Луны по известному значению теплового параметра $\gamma = (k\rho c)^{1/2}$ (Троицкий В.С., 1962). Идея заключалась в том, что теплопроводность пористых и дисперсных тел в вакууме должна зависеть, главным образом, от их объемного веса, а не от природы вещества, т.е. его теплопроводности при плотном состоянии (теплопередача определяется в этих материалах в основном состояни-

ем контактов зерен или тонкими перегородками пор.). Существенно здесь и значение теплопередачи через тепловое электромагнитное излучение в порах — это создает температурно-зависимую часть теплопроводности.

По данным измерений теплопроводности пористых керамических тел и земных пород в воздухе было показано, что теплопроводность является линейной функцией только ρ и не зависит от природы материала, т.е. $K = \alpha \rho$ в интервале плотностей пород $0,4 \leq \rho \leq 1,5$. Можно полагать, что такая же линейная зависимость имеется и для пористых материалов в вакууме или, по крайней мере, в другой функциональной зависимости: $K = K(\rho)$. В обоих случаях величина γ будет только функцией ρ и c . Величина α для пористых пород в вакууме в то время была определена, к сожалению, довольно приближенно. Поскольку минералогический состав лунной поверхности не отличается от земного, а γ для пород Луны определяется из наблюдений, то указанная универсальная функция может служить для определения плотности ρ пород на Луне. В результате было получено, что плотность породы в случае твердопористой структуры должна быть $\rho \approx 0,4 + 0,1 \text{ г.см}^{-3}$.

Неоднородность свойств в глубину. Толщина пористого слоя. По мере изучения свойств верхнего покрова возникла задача оценки степени его неоднородности в глубину. Общие соображения говорят о том, что идеальной однородности верхнего покрова не может быть. Несомненно, что уже на глубинах в несколько метров под давлением вышележащих слоев плотность вещества существенно увеличивается. С другой стороны, на самой поверхности может существовать, благодаря воздействию космических факторов, довольно тонкий рыхлый слой. Очевидно, что изучение неоднородности в верхней части слоя у самой поверхности возможно по наблюдению радиоизлучения Луны во время затмений. Из-за краткости процесса охлаждения поверхности все температурные изменения во время затмения разыгрываются в слое толщиной порядка 1 см. Следовательно, переменный тепловой режим этого слоя несет сведения о его характеристиках, а нижележащие слои влияния не оказывают.

Вследствие малой глубины проникания затменной теп-

ловой волны исследования радиоизлучения должны были проводиться на миллиметровых волнах. Такие измерения в наиболее широком диапазоне на волнах 0,12; 0,21; 0,4; 0,6; 0,75; 1,8; 2,2 см были выполнены в НИРФИ в экспедициях, в том числе высокогорных во время затмений Луны 06.07.63; 30.12.63; 25.06.64; 19.07.64; 19.12.64 гг. (Каменская С.А., Кисляков А.Г., Кротиков В.Д. и др. 1963). Для интерпретации была разработана аналитическая теория радиоизлучения затменной Луны (Троицкий В.С., 1965). При этом сначала решалось уравнение теплопроводности для заданного изменения температуры поверхности Луны во время затмения. Эти изменения хорошо аппроксимировались кусочно-линейными функциями, соответствующими фазам периода наступающей полутени, полной тени и отступающей полутени. Далее, по найденному значению температуры $T(x, t)$ в слое, решением уравнения переноса, находилась функция $T_{\lambda}(t, \lambda)$ изменения радиотемпературы данного участка поверхности Луны. Было найдено, что максимальные изменения радиотемпературы имеют место в конце теневой фазы. Обратная величина такого изменения оказывается пропорциональной величине отношения глубины проникания электромагнитной волны к затменной тепловой, что позволяет по затмению определить такую же комбинацию параметров, которая определяет фазовый ход радиоизлучения. Эти параметры относятся к слою толщиной порядка 1 см.

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

$$\gamma / b \sqrt{\epsilon} = 6,5 \cdot 10^4$$

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

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

Однако ряд данных указывает на увеличение плотности в глубину. Этой причиной, в частности, объяснялось расхождение в величине γ , определенной по лунациям и затмению. Соответствующие величины составляют 600–700 и 1000–1100. Оказалось, что этот эффект объясняется, главным образом, довольно сильной зависимостью теплопроводности лунного вещества от температуры за счет радиационного переноса тепла в порах вещества и небольшим увеличением плотности в слое 1–2 см (Шуко О.Б., 1969).

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

Таким образом, локационные исследования представляли уникальную возможность. Однако редукция этих измерений была неполной из-за неучета влияния шероховатости. В силу этого, наблюдалось значительное расхождение между радиоастрономическими и локационными определениями коэффициента отражения на сантиметровых волнах. Причина расхождения состоит в том, что локационные измерения дают не сам коэффициент отражения, а его произведение на фактор Q , учитывающий влияние шероховатости. Как известно, непосредственно измеряемой величиной является поперечник сечения обратного рассеяния, теоретическое значение которого равно

$$\sigma = Q \Gamma_{\perp} \pi r_{\lambda}^2,$$

где πr_{\perp}^2 - геометрический поперечник диска Луны, R_{\perp} - френелевский коэффициент отражения для перпендикулярного падения волн. Для гладкой поверхности $q = 1$, а для ламбертовской, отражающей диффузно, $q = 8/3$. Не существовало теории для определения q при других степенях шероховатости. Для Луны, как очевидно, отражение метровых и более длинных волн будет зеркальным, как от гладкой поверхности, переходя по мере укорочения волны к диффузному ламбертовскому отражению. Однако при интерпретации данных радиолокации для всех волн принималась $q = 1$, что заведомо завышало коэффициент отражения на сантиметровых волнах. Для этих волн получалось $q R_{\perp} = 0,04$, что при $q = 1$ дает $\epsilon = 2,7$ вместо $\epsilon = 1,7$ ($R_{\perp} = 0,02$) определяемого по радиоизлучению.

Для того, чтобы надежно использовать радиолокационные данные была поставлена специальная работа по определению величины q для Луны. Для этого использовались измерения на моделях в оптическом диапазоне (Богданов А.А., Брусин И.Я., Кагорлицкий М.С. и др., 1968). Модель шероховатости считалась соответствующей лунной, если зависимость интенсивности света, рассеянного назад плоской шероховатой пластиной, в зависимости от угла падения была близка к известному угловому спектру мощности обратного рассеяния Луны на данной длине волны. Затем изготовлялись шарики с выбранным характером шероховатости, для которых по обратному рассеянию света в сравнении с обратным рассеянием гладкого шара определялась величина q . Было найдено, что для сантиметровых волн $q = 1,6 + 0,2$, а для дециметровых $q = 1,06 + 0,1$. Анализ редуцированных таким образом зарубежных радиолокационных измерений коэффициента отражения показал, что наблюдается довольно резкое увеличение коэффициента отражения на волнах около 35 см и 8-10 м. Это было интерпретировано как увеличение плотности вещества, имеющего место довольно резко на некоторых глубинах h_1 и h_2 под поверхностью. Действительно, для волны $\lambda \ll h_1$ отражение будет определяться диэлектрической постоянной слоя на его границе с вакуумом, а для волны $\lambda \gg h_1$ этот, менее плотный слой, является тонким и не будет иметь значения. Коэффициент отражения этой волны будет определяться нижепо-

жашей плотной средой.

То же самое рассуждение относится и к следующему скачку спектра отражения, только ему соответствует существенно большая глубина скачка плотности. Исторически вначале был проведен анализ и интерпретация первого скачка в спектре коэффициента отражения Луны в диапазоне волн от сантиметровых до метра (Матвеев Ю.Г., Сучкин Г.Л., Троицкий В.С., 1965). При этом для неоднородного распределения плотности вещества в глубину был рассчитан спектр коэффициента отражения, описываемый уравнением Фикатти. Принимался экспоненциальный закон изменения плотности в виде

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

где h_1 - характерная толщина верхнего неплотного слоя, ρ_1 - плотность на поверхности, ρ_2 - плотность в глубине при $h \gg h_1$. Экспериментальный спектр хорошо согласуется с расчетом для модели $\rho_1 = 0,8 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$, $\rho_2 = 1,0 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$, $h_1 \approx 4 \text{ см}$. Таким образом, плотность, а следовательно, и теплопроводность вещества меняется на протяжении в несколько сантиметров примерно в 1,5 раза.

Полный аналогичный расчет спектра с двумя скачками плотности, выполненный позднее, показал, что наилучшее согласие имеет место с моделью, когда слой с $\rho_2 = 1,0 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$ простирается до глубины порядка 200-300 см, где плотность возрастает до плотности скальных пород, равной $\rho_0 \approx 2,5 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$. (Тихонова Т.В., Троицкий В.С., 1969). Поскольку при локационных исследованиях вклад в обратное рассеяние дает центральная часть диска Луны, то полученная картина распределения относится к этому району поверхности Луны.

Поток тепла из недр Луны и толщина пористого слоя. Тепловая история Луны. По мере накопления точных измерений радиотемпературы Луны на целом ряде волн был получен детальный спектр постоянной составляющей радиотемпературы в диапазоне волн от 0,4 до 60 см. Оказалось, что рост температуры

имеет место до волны 30–35 см. Далее, с удлинением волны температура не меняется. Прекращение роста радиотемпературы с волной однозначно свидетельствует об увеличении плотности вещества в глубину, начиная с 4–8 метров, что приводит к сильному увеличению его теплопроводности и, следовательно, к уменьшению градиента температуры. Заметим, что начальные оценки потока тепла делались по части спектра (волны 3 – 15 см) постоянной составляющей, соответствующей изученному по лунным верхнему метровому слою вещества. Несомненно, что существование плотной подложки пористого слоя оказывало влияние и на эту часть спектра. Отсюда возникла задача разработки теории радиозлучения плоско-слоистой среды с заданным законом изменения плотности в глубину при наличии потока тепла из недр Луны. Оказалось, что наблюдаемому спектру достаточно хорошо соответствует двухслойная модель, когда плотные скальные породы покрыты пористым слоем толщиной 3–5 м с неизменной плотностью (1 г.см^{-3}) и теплопроводностью, либо более толстым слоем с линейным изменением плотности. Для обеих моделей тепловой поток оказался в пределах $q_g = (0,7 - 0,9) \text{ кал.см}^{-2}\text{с}^{-1}$ (Тихонова Т.В., Троицкий В.С., 1969).

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

Полученное значение плотности потока тепла из недр Луны почти в 4 раза превышает теоретические оценки потока тепла, исходящие из предположения об образовании Луны из вещества, аналогичного веществу каменных метеоритов-хондритов. Полученный экспериментальный результат приводит к далеко идущим заключениям о происхождении и тепловой истории Луны. В самом деле, по современным данным основным источником внутреннего тепла планет является тепло, выделяемое при радиоактивном распаде содержащихся в породах урана, тория и изотопа калия. Если предположить, что, как и у Земли, поток тепла из недр Луны связан с распадом этих элементов и что к настоящему времени тепловой процесс достиг стационарности, то все выделяемое Луной тепло равно теплу радиоактивного рас-

пада. Общее тепловыделение составляет $Q = 10^{19}$ кал.год⁻¹, т.е. на один грамм вещества Луны приходится тепловыделение $q_m = 1,35 \cdot 10^{-7}$ кал.г⁻¹год⁻¹. Эта плотность тепловыделения примерно в 4 раза больше, чем соответствующая величина для Земли, равная $0,35 \cdot 10^{-7}$ кал.г⁻¹год⁻¹ и в несколько раз больше, чем у каменных метеоритов-хондритов, у которых тепловыделение по разным литературным источникам дается в пределах от $0,4 \cdot 10^{-7}$ до $1 \cdot 10^{-7}$ кал.г⁻¹год⁻¹. Таким образом, средняя концентрация радиоактивных элементов в лунном веществе в 4 раза больше, чем у Земли.

Новые данные существенно меняют представления о тепловой истории Луны. Соответствующие расчеты (Орнатская О.И., Альбер Я.И., 1967), (Троицкий В.С., Орнатская О.И., Цейтлин Н.М., 1976) показали, что только при этой высокой концентрации радиоактивных элементов достигается почти полное расплавление вещества Луны и, следовательно, обеспечивается наиболее полная дифференциация недр и вынос радиоактивных элементов на поверхность. Процесс выноса радиоактивных элементов к поверхности обусловлен тем, что последние химически связываются с легкими силикатными породами. Вынос радиоактивных элементов к поверхности приводит к прекращению в дальнейшем нагрева недр, так как все тепловыделение происходит теперь у поверхности и тепло рассеивается в пространство. В результате процесса дифференциации недр наступает равновесное тепловое состояние или медленное охлаждение планеты.

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

Зная общее содержание радиоактивных элементов в теле Луны и на самой поверхности, а также делая предположение о характере закона убывания концентрации с глубиной, можно определить эффективную толщину слоя радиоактивной породы. Соответствующие расчеты показали (Троицкий В.С., 1970), что если лунная кора состоит из пород типа земных гранитов со свойственной им высокой концентрацией радиоактивных элементов и их концентрация убывает с глубиной по экспоненте, то для объяснения наблюдаемого потока тепла эффективная толщина слоя, в котором концентрация убывает в 2,7 раза, должна быть около 10 км, для базальтовой коры необходима толщина 40 км. Породы, доставленные с Луны Аполлоном $\bar{11}$, показали, что их радиоактивность (тепловыделение на грамм за год) близка к радиоактивности земных базальтов и равна $(1,0 - 1,2) \times 10^{-6} \text{ кал. г}^{-1} \text{ год}^{-1}$. Это дает эффективную толщину слоя с радиоактивными элементами около 60 км. Чтобы радиоактивные элементы были вынесены в такой тонкий слой, расплавление должно быть практически полным.

Таким образом, Луна в целом представляет подобие термостата, нагревательные элементы которого расположены на периферии в слое толщиной ~ 50 км. Отсюда нетрудно оценить температуру недр, которая будет расти примерно до этой глубины. При обычной теплопроводности твердых непористых пород и найденном потоке тепла Γ радиент температуры составляет около 15° км^{-1} , т.е. уже на глубине 50 км температура достигает 600–700 К.

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

возможностей измерений.

Для оценки доли радиационного переноса необходимо было найти явления, в достаточно сильной степени определяемые температурной зависимостью теплопроводности. Такое явление, как оказалось, существует. Было доказано, что наличие слабой температурной зависимости теплопроводности приводит к качественно новому эффекту, состоящему в увеличении постоянной составляющей температуры в глубину в слое порядка $(2-4)l_T$ за счет детектирования температурной волны, распространяющейся в нелинейной среде, т.е. среде, свойства которой зависят от величины самой температурной волны (Троицкий В.С., Кротков В.Д., 1963). Вследствие этого эффекта постоянная составляющая должна расти в глубину в пределах досягаемости суточной температурной волны, т.е. $(3-4)l_T$ и далее оставаться неизменной. Следовательно, на волнах 1,5-2 см, измерения, на которых дают температуру на глубинах $(3-4)l_T$ соответственно, постоянная составляющая должна быть выше, чем на поверхности на всю величину прироста температуры из-за температурной зависимости тепловых свойств. Таким образом, измеряя постоянную составляющую температуры на поверхности (на инфракрасных волнах) и в глубине (на волнах 1,5-3 см) можно найти прирост постоянной составляющей температуры и определить долю радиационной теплопроводности. Такое определение стало возможным благодаря точным измерениям радиотемпературы по методу "искусственной луны". Было обращено внимание на то, что постоянная составляющая инфракрасной температуры на 10-15°K ниже, чем радиотемпература на волне 3,2 см. Сравнением с теорией было найдено, что радиационная часть теплопроводности при температуре 300°K составляет 25% от решеточной для непрозрачного на инфракрасных волнах лунного вещества и 50% для полупрозрачного. Отсюда получается, что размеры пор и сцепленных частиц рыхлопористого покрова должны быть заключены в пределах 50-300 мкм (Троицкий В.С., 1967).

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

ляется применимым для описания теплопередачи в лунном слое. В результате теоретического рассмотрения этого вопроса получено модифицированное уравнение теплопроводности, позволяющее учесть влияние лучистого переноса (Троицкий В.С., 1969). Степень этого влияния для условий Луны оказалась несущественной.

Был теоретически рассмотрен вопрос о совместном влиянии температурной зависимости как тепловых параметров, так и угла потерь вещества. Оказалось, что последнее имеет значение для коротких миллиметровых волн, на которых постоянная составляющая из-за этого эффекта возрастает на $10-20^{\circ}$ для волн $0,1-0,2$ см (Троицкий В.С., Бузов А.Б., Алешина Т.Н., 1968). Этот эффект экспериментально не изучался из-за трудностей точных измерений по методу искусственной Луны на этих волнах.

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

Совокупность данных о физическом состоянии и структуре верхнего покрова Луны позволила оценить прочность лунного материала (Троицкий В.С. и др. 1966). Эти данные, приведенные в таблице, использовались при проектировании первого Лунохода и подтверждены, как многие другие, последующими прямыми измерениями.

Однородность свойств по поверхности. Сравнение с прямыми измерениями. Полученные выше данные характеризуют средние по всей полусфере Луны параметры. Поэтому, естественно, возникает вопрос о том, в какой мере они соответствуют локальным значениям, полученным прямыми измерениями в данной точке поверхности или с высоким разрешением, при котором имеет место усреднение по площади в десятки и сотни километров. Согласно исследованиям на инфракрасных волнах, тепловые свойства по диску Луны за исключением

днищ лучистых кратеров меняются очень мало, не более, чем на 20–25% при усреднении в несколько десятков километров. Эти измерения находятся практически в пределах точности измерения. Обнаружена также достаточно большая степень однородности по диску характеристик радиоизлучения при усреднении по юшдям от десятков до сотен километров (Кисляков А.Г., Лосовский Б.Я., Саломонович А.Е., 1963), (Лосовский Б.Я., Саломонович А.Е., 1966). В связи с этим можно говорить о существовании в масштабе сотни километров радиометрической однородности, аналогичной известной фотометрической однородности, представляющей стандартность характеристик отраженного света. В оптическом диапазоне это указывает на однородность микроструктуры поверхности, в инфракрасном диапазоне – на однородность тепловых параметров, а в радиодиапазоне радиометрическая однородность указывает на то, что электрические свойства вещества по поверхности Луны в приведенном выше масштабе усреднения одинаковы. В частности, оказывается, что вещество на поверхности морей и материков практически одинаково. Заведомо не соответствует характеристикам излучения гипотеза, что верхняя порода материков – граниты, а морей – базальты (Троицкий В.С., 1963, 1964).

Представляет, несомненно, большой интерес сравнение дистанционных и прямых измерений различных параметров верхнего покрова Луны, выполненных космонавтами и автоматами непосредственно на Луне или в лабораториях на привезенных образцах. Ниже приводится соответствующая таблица.

Гли измерениях непосредственно на поверхности Луны, конечно, могут быть сильные различия в свойствах, связанные, например, с присутствием неразрушенных обломков скальных пород и т.п. В связи с этим довольно трудно проводить сравнения полученных нами данных и измеренных непосредственно на Луне. Радиоастрономические данные преимущественно являются усредненными для всего диска Луны в то время, как измеренные непосредственно в одном-двух местах не могут представлять надежно средние величины. Многие прямые измерения, особенно тепловых и электрических свойств, проводились на образцах пород,

отобранных космонавтами. При этом, обычно, неизвестно несколько эта выборка образцов представительна для большей части поверхности Луны. В связи с этим в таблице сравнения появляются широкие интервалы параметров, измеренных на образцах. Это относится к теплопроводности, коэффициенту температуропроводности и углу потерь. Очевидно, что образец в виде камня даст совершенно иные тепловые параметры, чем раздробленная пористая основа верхнего покрова, доставить которую в неизменном виде весьма трудно. Между тем, ряд измерений коэффициента температуропроводности делался именно для этих плотных слабепористых пород. Вызывает удивление слишком низкий тангенс угла потерь многих лунных образцов, который обычно имеет место лишь для очень кислых пород, тогда как по химическому анализу вещество Луны большей частью является основным (базальт). Обращает на себя внимание резкое противоречие данных прямых измерений ϵ и ρ пористого слоя с установленной для лунного вещества зависимостью $\epsilon = \epsilon(\rho)$.

Имеются и другие более мелкие невязки в данных прямых измерений. Можно также сказать, что некоторые невязки имеются и в данных дистанционных (радиоастрономических) измерений, однако в большинстве случаев, видимо, в пределах обычных ошибок измерений. Следует, однако, отметить, что радиоастрономические данные получены из совокупности соответствующих частных моделей, наилучшим образом определяющих тот или иной параметр. Расчет общей суммарной модели и согласование с ней всех параметров произведен не был и ждет своего исследования. Между прочим, то же замечание относится и к прямым измерениям.

Подводя итоги астрофизическим исследованиям Луны, можно сказать, что полученные данные являются не менее репрезентативными, чем данные прямых измерений, а, в частности, описания средних по поверхности характеристик более представительны, хотя средств на наземные радиоастрономические исследования Луны было затрачено на 4 - 5 порядка меньше, чем на прямые.

СРАВНЕНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ВЕЩЕСТВА ВЕРХНЕГО ПОКРОВА ЛУНЫ,
ПОЛУЧЕННЫХ ПО ДИСТАНЦИОННЫМ (РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКИМ)
И ПРЯМЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ

№ п/п	Наименование	Измерения		Примечание
		Дистанционные	Прямые	
1	2	3	4	5
1.	Структура верхнего покрова	Рыхлая, пористая	Рыхлая, пористая	Разброс значений прямых измерений связан с различной локализацией об- разцов и мест по- садок на Луне
2.	Толщина пористого слоя, м	4	4 - 10	
3.	Относительный объем пор, %	50 - 70		
4.	Размеры пор и частиц, мкм	59 - 300	160	
5.	Плотность вещества, г·см ⁻³ а) приповерхностный слой 1-2см б) основной пористый слой 4 м в) скальные породы	0,6 - 0,8	0,8 - 1,2	
		0,9 - 1,2	1,8	
		2,5 - 3,0	2,4 - 2,8	
6.	Несущая способность грунта (прочность), кг·см ⁻² а) приповерхностный слой 1-2см	0,8	0,2 - 0,6	

1	2	3	4	5
7.	б) основной пористый слой 4 м Внутреннее спекление грунта, кг·см ⁻²	2	4	5
8.	Содержание SiO ₂ , %	8 · 10 ⁻³	(1 - 7) · 10 ⁻³	Разброс значений, полученных радио-астрономическ и м
9.	Преобладающий тип породы	50 - 60	45 - 55	методом, определяются точностью измерений
10.	Химический состав по весу, %	Средние и основные	Основные	
11.	Градиент температуры пористого слоя, град-метр	SiO ₂ - 57,0 Al ₂ O ₃ - 16,5 FeO - 7,5 MgO - 3,5 CaO - 6,0 NO ₂ - 4,0 K ₂ O - 3,0 T ₂ O ₂ -	Базальт - гранит 47 - 76,4 19 - 12,0 12 - 1,8 3 - 0,5 14 - 1,1 1 - 0,5 0,5 - 6,0 2 - 0,7	
12.	Поток тепла из недр, кал·см ⁻² ·с ⁻¹	2 - 4	1,5	
13.	Удельный угол потерь на СВЧ $\rho - \tau \rho \Delta$	(0,7 - 0,9) · 10 ⁻⁶	(0,4 - 0,8) · 10 ⁻⁶	
14.	Глубина проникания электро-магнитных волн в основном слое в длинах волн	(8,0 - 10) · 10 ⁻³	(2,0 - 10) · 10 ⁻³	(10 - 60) λ

1	2	3	4	5
15:	Диэлектрическая постоянная вещества на СВЧ а) приповерхностный слой 1-2 см б) основной пористый слой 4 м в) скальные породы	1,7-2,0 2,4-2,8 5,0-6,0	2,4-2,8 5-6	
16.	ε - величина диэлектрической постоянной на СВЧ от плотности ε = ε(ρ)	$\sqrt{\epsilon} - 1 = 0,5 \rho$	$\sqrt{\epsilon} - 1 = 0,5 \rho$	
17.	Теплопроводность осадочного пористого слоя в кал·см·с·град	$(8-12) \cdot 10^{-6}$	$(20-90) \cdot 10^{-6}$	
18.	Коэффициент температуропроводности, см ² ·град	$4 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-5} - 3 \cdot 10^{-3}$	
19.	Глубина проникания суточной тепловой волны, см	5-7	7-8	
20.	Параметр $\chi = (\kappa \rho c)^{-1/2}$, κ - теплопроводность, с - теплоемкость вещества а) приповерхностный слой б) основной пористый слой	1000 500 - 800	400 - 600	

М е р к у р и й

Измерения радиоизлучения Меркурия в нашей стране начали проводиться на волне 0,8 см в ФИАН СССР (Кутуза Б.Г., Лосовский Б.Я., Соломонович А.Е., 1965). Эти измерения указали на существование зависимости интенсивности радиоизлучения от фазового угла освещенности планеты Солнцем. Последующие наблюдения на этой волне (Лосовский Б.Я., Головкин В.К., 1967) позволили определить величину фазового хода средней по диску яркостной температуры.

В Крымской астрофизической обсерватории были выполнены измерения радиоизлучения Меркурия при различных фазах, а также Венеры, Марса, Сатурна, Урана и Нептуна на волне 0,14 см. За стандартный источник принимался Юпитер (Костенко В.И., Павлов А.В., Шаломицкий Г.В. и др., 1971).

В ИРЭ АН СССР была проведена впервые в мире радиолокация Меркурия на волне 42 см, получена важная для определения свойств вещества поверхности характеристика — коэффициент отражения радиоволн от поверхности планет (Котельников В.А. и др., 1962). Полученный к 1967 г. материал отечественных и зарубежных радиоисследований Меркурия позволил провести их анализ (Ветухновская Ю.Н., Кузьмин А.Д., 1967) подобно тому, как это делалось для Луны. В указанной работе по радиолокационным данным определена диэлектрическая постоянная вещества верхнего покрова, оказавшаяся равной $\epsilon \approx 2,5$. Этому соответствует, согласно формуле Крстикова, плотность пород, равная $\rho \approx 1,2 \text{ гсм}^{-3}$.

В предположении о равномерном движении Меркурия по орбите проведены расчеты теплового режима. Однако это упрощение не позволило выявить особенностей нагрева планеты на различных гермографических долготах, в силу чего дальнейшие выводы были не очень надежны. В работе Сол-

тера 1967 г. было отмечено, что неравномерность движения Меркурия по орбите приводит к существенной зависимости температурного режима участков поверхности от их гермографических долгот. Вблизи перигелия, примерно в течение $+4$ земных суток, скорость орбитального движения Меркурия превышает скорость его собственного вращения, и Солянце на небе Меркурия движется в направлении, обратном его естественному движению. Это явление вызывает появление вторичных максимумов температуры на долготах 90° и 270° , а на других долготах приводит к асимметрии температурных изменений. Отсутствие данных о широтной зависимости суточных изменений температуры на различных гермографических долготах и недостаток информации о суточных вариациях температуры на экваторе требовали разработки детальной теории теплового режима с полным учетом всех особенностей движения Меркурия. В соответствии с этим в НИРФИ проведено теоретическое рассмотрение теплового режима верхнего слоя планеты на различных гермографических долготах и широтах (Кротиков В.Д., Шуко О.Б., 1975).

Как известно, вследствие резонанса вращения и обращения Меркурия, на его поверхности существуют две горячие области ($l = 0^\circ$ и 180°) и две холодные ($l = 90^\circ$ и 270°). Показано, что полуденная температура горячих областей на $120-130^\circ$ выше температуры холодных. Сопоставление теоретических значений полученных температур поверхности, рассчитанных для разных значений параметра $\chi = (\kappa \rho c)^{-1/2}$, с результатами наземных измерений в ИК диапазоне показало, что средняя по диску величина параметра χ для Меркурия равна 600 ± 100 .

На основе расчетов теплового режима и теории радиоизлучения для плоско-слоистой модели верхнего покрова получена функция распределения яркостной температуры $T_g(l, \varphi, \delta)$ для различных значений параметра $\delta = l_3 / l_T$ (Кротиков В.Д., Шуко О.Б., 1981). Эта функция была использована при рассмотрении интегрального радиоизлучения Меркурия. Получены соотношения, позволяющие рассчитать временные вариации интегрального излучения Меркурия, а также суточные изменения средней по диску яркостной температуры для случаев, когда к земле обращены горячие,

теплые или холодные области.

Так же, как и для Луны, рассмотрено влияние на интегральное излучение температурной зависимости коэффициента теплопроводности. Сравнение совокупности экспериментальных данных на волнах длиннее 3 см и рассчитанных зависимостей по диску температуры $\bar{T}_0(\alpha)$ дает возможность определить отношение радиационной теплопроводности к контактной, которое оказалось равным $\alpha(350^\circ) = 0,6 + 0,1$.

Указанному значению α для пород Меркурия соответствуют размеры частиц от 120 до 300 микрон.

По данным зарубежных измерений радиоизлучения Меркурия на волнах 3,3 мм и 3,75 см в "горячих", "холодных" и "теплых" областях и на основании теоретических зависимостей T_0/T_1 от δ для этих областей получено, что для миллиметровых волн $\delta/\lambda = 1,5$, а для сантиметровых $\delta/\lambda = 0,9$. Это отличие, по-видимому, свидетельствует о том, что верхний слой, соответствующий прониканию миллиметровых волн, более рыхлый, чем глубокий слой, соответствующий прониканию волны 3,75 см.

Для глубинного слоя, в предположении его однородности и что его диэлектрическая постоянная, определенная из локационных наблюдений, равна $\epsilon = 2,5$, получено $\rho^{-1} \times t_0 \Delta \approx 0,006$. Это соответствует породе, богатой двуокисью кремния ($S_1 O_2 \approx 50\%$).

Обширные наблюдения Меркурия проводились в САО АН СССР на радиотелескопе РАТАН-600 на волнах 1,35, 2,08, 3,9, 8,2 и 13 см. Преследовались две цели: определение зависимостей средней яркостной температуры от фазы и использование радионаблюдений Меркурия вблизи Солнца для улучшения его эфемерид. Впервые в радиоастрономии получена точность координатных измерений планеты, сравнимая с точностью оптических измерений, — около 1 секунды дуги (Афанасьева П.М., Фомин В.А., 1970).

В е н е р а

Первые радионаблюдения Венеры у нас в стране были проведены на волне 0,8 см в 1959 г. в ФИАН (Кузьмин

А.Д., Саломонович А.Е., 1960). Оказалось, что яркостная температура Венеры на указанной волне значительно меньше, чем радиотемпература, измеренная ранее за рубежом на сантиметровых волнах. Этот эффект объясняется тем, что источником излучения на миллиметровых волнах являются слои венерианской атмосферы, более холодные, чем ее твердая поверхность. Предложенная модель "холодной атмосферы" была затем развита К.Саганом (1962) и рядом других авторов в так называемую "парниковую" модель.

С другой стороны, Джонсоном (1961) была предложена модель "горячей атмосферы" в которой предполагалось, что источником высокотемпературного излучения в сантиметровом диапазоне является мощная ионосфера Венеры. В миллиметровом диапазоне ионосфера должна быть прозрачной и, следовательно, низкотемпературное миллиметровое излучение обусловлено холодной поверхностью Венеры. Предлагались и другие аналогичные модели (см., например, Кузьмин А.Д., 1963).

Позднее измерения радиоизлучения Венеры в Советском Союзе были проведены на волне 0,4 см (Кисляков А.Г., Кузьмин А.Д., Саломонович А.Е., 1962), а также на волнах сантиметрового диапазона (Ветухновская Ю.Н., Кузьмин А.Д., Кутуза Б.Г., Саломонович А.Е., 1963).

Наиболее детально обсуждались "парниковая" и "ионосферная" модели. Первая приводила к исключительно высокой температуре (до 750°К) и к огромным давлениям на поверхности Венеры (до 100 атмосфер), а вторая к условиям, близким к земным. Для разрешения этой дилеммы в ГАО АН СССР и в ФИАН были предложены и поставлены специальные измерения радиоизлучения Венеры. В ГАО поставили уникальный по тому времени эксперимент — измерение распределения радиояркости по диску Венеры с помощью Большого пулковского радиотелескопа (БПР). Этот радиотелескоп был тогда единственным инструментом, с которым можно было поставить такие измерения, благодаря его высокой разрешающей способности, а также благодаря использованию созданного впервые в мире широкополосного радиометра с параметрическим усилителем на входе (Корольков Д.В., Тимофеева Г.М., 1963, 1964). Если имеет место "парниковая" модель, то должно наблюдаться

уменьшение радиояркости к краям диска, а при "ионосферной" — наоборот уярчение.

Измерения на волне 3,2 см показали, что "наблюдения . . . ближе всего согласуются с моделью горячей поверхности и холодной атмосферы", когда температура твердой поверхности составляет около 600°К, а давление 10–100 атмосфер (Корольков Д.В., Парийский В.Н., Тимофеева Г.М., Хайкин С.Э., 1963).

Однако в то время на эту работу не было обращено должного внимания, отчасти из-за неполной однозначности выводов, вследствие еще недостаточно высокой разрешающей силы, составлявшей 1,0" и сравнимой с угловыми размерами Венеры, а также вследствие появившегося сообщения об аналогичных измерениях на волне 10 см, проведенных на интерферометре в США в Калифорнийском технологическом институте, в которых не было обнаружено потемнения к краю диска. В силу этого, в 1964 г. для окончательного решения вопроса о модели радионезлучения Венеры были проведены специальные измерения поляризации ее радионезлучения (Кузьмин А.Д., Кларк, 1965).

Идея эксперимента, предлагавшегося ранее (Кузьмин А.Д., Саломонович А.Е., 1961), состояла в том, что излучение планеты должно быть поляризовано на краях видимого диска, если излучает поверхность планеты, или неполяризованным, если излучает ионосфера. Для получения необходимого в этом эксперименте высокого разрешения измерения были проведены на радиointерферометре обсерватории Оуэнс Вэллей Калифорнийского технологического института (США). В результате была обнаружена и измерена поляризация на краях видимого диска, доказывавшая, что источником радионезлучения является нагретая до 600–700°К поверхность. Используя высокое угловое разрешение радиointерферометра, впервые был определен также радиус поверхности Венеры (6057 км).

Проведенный позднее эксперимент на АМС серии "Венера" подтвердил высокую температуру поверхности планеты.

Следующей проблемой, решением которой занялось ГАО АН СССР, было выяснение природы поглощающего агента в "парниковой" модели. В литературе обсуждались

три возможности: поглощение в облачном слое, поглощение всей толщей атмосферы в радиолниях, расширенных большим давлением, и, наконец, поглощение неизвестным химическим агентом. Все эти модели дают различные эффекты потемнения к краю. Однако для уверенного измерения потемнения необходимо было более высокое разрешение и более короткая волна, на которой толщина атмосферы больше единицы. Для измерений было резко улучшено качество поверхности каждого элемента БПР, изменена методика юстировки радиотелескопа и создан новый широкополосный радиометр на волну 0,8 см, обладавший в те годы рекордной чувствительностью. Наблюдения с разрешением в 15" позволили сделать выбор между тремя моделями в пользу поглощения всей толщей атмосферы. Наблюдения с высоким разрешением также позволили обнаружить значительную асимметрию в распределении радиояркости, которая хорошо соответствовала асимметрии в радиоальbedo по данным радиолокационных наблюдений (Гольнев В.Я., Парийский Ю.Н., Фридман П.А., Шварис О.Н., 1969).

В Пулковке были проведены также двухгодичные наблюдения за радиоизлучением Венеры на волне 3,95 см с помощью высокочувствительного радиометра с параметрическим усилителем на входе с целью обнаружения фазового хода излучения. Эти наблюдения привели к значительно меньшим фазовым эффектам, чем считалось ранее по отечественным и зарубежным наблюдениям тех лет (Тимофеева Г.М., доклад 1963).

Существование твердой поверхности Венеры естественно ставило задачу определения ее свойств по радиоизлучению на волнах длиннее 2 см, для которых атмосфера Венеры прозрачна. Физической основой для этого являлось возможное существование переменного суточного нагрева поверхности. Так и для Луны, измерение фазового хода на ряде волн давало бы те же сведения. В связи с появлением данных о наблюдении такого изменения радиотемпературы на волнах 3,2 см и 10 см, была разработана теория радиоизлучения Венеры, наблюдаемой с Земли (Троицкий В.С., 1964). Как оказалось позднее, количественные данные фазового хода радиоизлучения Венеры были сильно завышены, однако, тем не менее, они позволили, используя указанную

теорию, правильно определить, что у Венеры имеет место обратное направление собственного вращения.

На основе радиоастрономических измерений как отечественных, так и зарубежных была произведена оценка содержания водяного пара в нижней атмосфере Венеры, и получено, что его относительное содержание составляет не более 0,1% (Ветухновская Ю.Н., Кузьмин А.Д., Наумов А.П., Смирнова Т.В., 1971), (Смирнова Т.В., Кузьмин А.Д., 1974).

М а р с

Первые в Советском Союзе наблюдения радиоизлучения Марса, а также Меркурия и Сатурна были выполнены в 1965 г. в 8-миллиметровом диапазоне волн на радиотелескопе ФИАН РТ-22 (Кутуза Б.Г., Лосовский Б.Я., Саломонович А.Е., 1965); а затем в инфракрасном диапазоне (Мороз В.И., Давыдов В.Д., Жегулев В.С., 1969). К этому времени за рубежом были проведены измерения в достаточно широком диапазоне волн: от 0,12 до 21,3 см, а также на инфракрасных волнах. Однако эти данные не использовались для определения физических характеристик вещества поверхности. Дело в том, что, как мы видели на примере Луны, в основу анализа свойств вещества должны быть положены данные о фазовом (суточном) изменении собственного излучения. Подобный метод был применен в НИРФИ для изучения поверхности Венеры и Меркурия. Однако при наблюдении с Земли Марса нельзя пронаблюдать весь фазовый цикл. Практически можно говорить лишь о наблюдении полностью освещенной стороны полусферы Марса, например, в противостоянии. Это, на первый взгляд, делает невозможным наблюдение суточной тепловой волны, распространяющейся вглубь Марса, и, следовательно, получение соответствующих данных о тепловых электрических свойствах вещества.

Однако это не совсем так. Условия исследования собственного радиоизлучения Марса можно проиллюстрировать на примере Луны, если считать, что мы могли бы наблю-

дать Луну только в полнолуние. Мы всегда видели бы одну и ту же не меняющуюся во времени "застывшую" картину распределения температуры суточной волны в глубину. То же самое имеет место для наблюдения Марса. Если поверхность Марса по сфере однородна по свойствам, то приходящие, благодаря его вращению, новые участки поверхности на видимом с Земли диске будут иметь то же самое распределение в глубину тепловой волны. Следовательно, картина распределения температуры в глубину, видимая с Земли, будет неизменной, хотя индивидуально в данном месте диска планеты она будет связана с непрерывно сменяющимся веществом. Если же распределение свойств вещества по поверхности неоднородно, то картина теплового поля будет периодически меняться соответственно с приходом в поле зрения участков поверхности с другими свойствами вещества.

Теперь очевидно, что характер распространения тепловой волны, по которому определяются тепловые и электрические параметры, может быть измерен при одновременном наблюдении радиоизлучения Марса в противостоянии на ряде волн, зондирующих разные глубины. В соответствии с этими соображениями в НИРФИ была разработана теория и проведена интерпретация имевшихся к 1969 г. данных радиоизлучения Марса. Было показано, что весь информативный спектр радиоизлучения Марса расположен, в основном, в миллиметровом диапазоне волн. Были получены первые предварительные сведения о плотности вещества, диэлектрической постоянной, тепловых и электрических параметрах (Троицкий В.С., 1970). Наиболее надежно определена диэлектрическая постоянная, равная $\epsilon \approx 3$, и плотность $\rho \approx 1,5 \text{ гсм}^{-3}$.

Проведенные в ФИАН в 1971 г. во время великого противостояния Марса измерения радиоизлучения на волне 8 мм позволили оценить угол потерь вещества Марса (Ветухновская Ю.Н., Кузьмин А.Д., Лосовский Б.Я., 1974).

В дальнейшем подобные исследования Марса с Земли практически были прекращены, т.к. для этого не было достаточно больших радиотелескопов, работающих к тому же на миллиметровых волнах. Кроме того, точные измерения на миллиметровых волнах весьма затруднены. Однако ста-

ли возможными радиоастрономические исследования с борта спутников Марса. В 1971 г. такие исследования были проведены с борта АМС "МАРС-3", где был установлен автоматически действующий радиотелескоп с диаметром антенны 0,6 м, предназначенный для измерения яркостной температуры собственного радиоизлучения планеты на волне 3,4 см в двух линейных ортогональных поляризациях. Линейное разрешение по поверхности составляло 100 км. Была специально для этого случая разработана теория наблюдения радиоизлучения. Измерения показали, что в экваториальной области диэлектрические свойства поверхности довольно однородны. Оказалось, что диэлектрическая постоянная меняется по поверхности от 2 до 7 и, следовательно, плотность от 1,1 до 1,9 г.см⁻³. Средние взвешенные величины для поверхности получаются: $\epsilon = 3,5$ и $\rho = 1,5$ г.см⁻³ (Башаринов А.Е., Дроздовская И.В. и др., 1972). Эти величины хорошо соответствуют данным, определенным при наблюдении с Земли. Аналогичные исследования проводились также позднее с борта станции "Марс-5" (Башаринов А.Е., Ветухновская Ю.Н. и др., 1976).

Ю п и т е р и е г о с п у т н и к и

Юпитер привлекал внимание радиоастрономов мощной атмосферой и наличием сильных поясов радиации, обнаруженных радионаблюдениями в начале 60-х годов. Наиболее обширные радиоисследования Юпитера у нас в стране проводились в ГАО АН СССР. Для этого использовались волны 3,2 см (Корольков О.В., Парийский Ю.Н., Тимофеева Г.М., 1964), 6,5 см (Гольнев В.Я., Липовка Н.М., Парийский Ю.Н., 1964), затем 3,95 см (Соболева Н.С., Тимофеева Г.М., 1969), а на волне 6,6 см были проведены поляризационные измерения. Высокое разрешение Большого Пулковского радиотелескопа позволило точнее отделить тепловое излучение диска планеты от излучения поясов радиации и изучать их отдельно, а также заглянуть в "подоблачный" слой. Оказалось, что характер радиоизлучений поясов

радиации на указанных волнах резко отличен от их излучения в дециметровом диапазоне, а яркостная температура диска планеты (за вычетом излучения поясов) примерно на 190° выше инфракрасной. Полученный спектр радиоизлучения Юпитера использовался для уточнения модели атмосферы планеты. Оказалось, что нетепловое излучение поясов радиации на сантиметровых волнах расположено ближе к планете, чем хорошо изученное дециметровое излучение. Это позволило думать о наличии "внутренних" поясов радиации, подобно тому, как это обнаружено в структуре земных поясов радиации. Из поляризационных наблюдений следовало указание на деформацию поясов радиации солнечным ветром, которая была подтверждена прямыми исследованиями в последующие годы. По радиоизмерениям впервые был оценен химический состав невидимой в оптике подоблачной части атмосферы Юпитера (Парийский Ю.Н., 1971). Идея метода основывалась на теории теплового СВЧ радиоизлучения атмосферы Юпитера, данной Филдом. Им было показано, что в сантиметровой области для водородно-гелиевой атмосферы яркостная температура излучения пропорциональна λ^{n-1} , где $n = C_p / C_v$ атмосферы. Наблюдения дали значение n , соответствующее водородной атмосфере с содержанием гелия, равным 15%. Дана также оценка обилия аммиака как основного поглощающего радиоволны компонента. В настоящее время радионаблюдения продолжаются на РАТАН-600.

Вместе с исследованиями Юпитера представляет большой интерес изучение его спутников, в частности, потому, что система Юпитера со спутниками является как бы солнечной системой в миниатюре.

Первые наблюдения спутника Юпитера в СССР выполнены в ФИАН СССР. В 1971 г. было измерено радиоизлучение Каллисто на волне 0,8 см (Кузьмин А.Д., Лосовский Б.Я., 1973). Оказалось, что измеренная яркостная температура примерно в два раза превышает расчетную равновесную температуру. Для объяснения этого была предложена модель ледяной поверхности спутника.

В САО АН СССР радиотелескоп РАТАН-600 позволил поставить наблюдения на волнах 2,08 и 3,95 см всех четырех Галлилеевых спутников Юпитера, к которым были обнару-

жены в наблюдениях 1975–1977 гг. (Мингалиев М.Г. и др., 1975, Берлин А.Б. и др., 1976). Радиоизлучение Ио и Европы было зарегистрировано впервые в радиоастрономии. Для трех спутников (кроме Европы) построены спектры радиоизлучения. У всех спутников радиоизлучение носит тепловой характер с яркостной температурой несколько выше, чем равновесная. Температура Ио на волне 3,95 ока – залась выше, чем на волне 2,08 см.

С а т у р н, У р а н

Первые в Советском Союзе наблюдения Сатурна были выполнены на волне 0,8 см (Кутуза Б.Г., Лосовский Б.Я., Саломонович А.Е., 1965). По всем имеющимся радиоданным оценено содержание аммиака в атмосфере Сатурна (Кузьмин А.Д., Наумов А.П., Смирнова Т.В., 1974). Радиоизлучение Урана исследовалось в САО АН СССР с помощью радиотелескопа РАТАН-600. Основной результат получен в 1980–81 гг. по вековому изменению радиотемпературы планеты, обнаруженному американскими радиоастрономами. Оказалось, что в 1981 г. средняя яркостная температура Урана в 1,5 раза выше, чем в 60-х годах.

Обширные экспериментальные исследования планет и их спутников продолжают сейчас в САО АН СССР на радиотелескопе РАТАН-600, для приема излучения которых используется уникальное высокое угловое разрешение радиотелескопа при достаточно большой эффективной площади антенны и высокочувствительные радиометры.

- Алексеев В.А., Алешина Т.Н., Кротиков В.Д., Троицкий В.С. Влияние шероховатости верхнего покрова Луны на излучательную способность и распределение радиояркости. - Астрон. ж., 1967, т. 44, № 5, с. 1070-1074.
- Алексеев В.А., Кротиков В.Д. Поляризация интегрального радиоизлучения Луны. - Радиофизика, 1968, т. 11, № 8, с. 1185-1187.
- Алексеев В.А., Кротиков В.Д. Поляризационные характеристики радиоизлучения Луны при учете усредняющего действия диаграммы направленности ножевого типа. - Радиофизика, 1969, т. 12, № 1, с. 5-8.
- Афанасьева П.М., Фомин В.А. Определение прямых восхождений Меркурия на радиотелескопе РАТАН-600. Письма в А.ж., 1978, т. 4, № 7, с. 328-330.
- Берлин А.Б., Парийский Ю.Н. и др. Наблюдения галлилеевых спутников Юпитера на РАТАН-600. - Письма в А.ж., 1978, т. 2, № 8, с. 405-409.
- Богданов А.А., Брусин И.Я., Кагорлицкий М.С., Тихонова Т.В. Исследование поперечного сечения рассеяния Луны для радиоволн на моделях в оптическом диапазоне. - Радиофизика, 1968, т. 11, № 6, с. 801-806.
- Бондарь Л.Н., Зелинская М.Р., Стрельцова К.М., Троицкий В.С. Оценка химического состава лунного вещества по радиоастрономическим наблюдениям. - Астрон. вестн., 1969, т. 3, № 4, с. 191-192.
- Basharinov A.E., Drozdovskaya I.B., and others. Microwave radiometry of Mars from the Mars 2 and Mars 3 Orbiters. - ICARUS, 1972, 17, 540-542.
- Башаринов А.Е., Ветухновская Ю.Н. и др. Радиоастрономические исследования с борта АМС "МАРС-5". - Кос-

- мические исследования, 1976, т. 14, вып. 1, с. 79-79.
- Ветухновская Ю.Н., Кузьмин А.Д. Планета Меркурий. - Астрон.вестник, 1967, т. 1, № 4, с. 198-212.
- Ветухновская Ю.Н., Кузьмин А.Д., Наумов А.П., Смирнова Т.В. Определение параметров атмосферы Венеры на уровне средней поверхности по радиоастрономическим и радиолокационным измерениям. - Астрон. ж., 1971, т. 48, № 1, с. 146-156.
- Ветухновская Ю.Н., Кузьмин А.Д., Лосовский Б.Я. Определение диэлектрических потерь материала поверхности Марса по его радиоизлучению в миллиметровом диапазоне. - Астрон. ж., 1974, т. 51, № 2, с. 413-416.
- Гольнев В.Я., Липовка Н.М., Парийский Ю.Н. Наблюдение радиоизлучения Кюпитера на волне 6,5 см в Пулковке. - ДАН СССР, 1964, т. 257, № 3, с. 554-556.
- Гольнев В.Я., Парийский Ю.Н., Фридман П.А., Шиврис О.Н. Распределение радиояркости по диску Венеры на волне 8 мм. - ДАН СССР, 1969, т. 188, № 2, с. 297-299.
- Зелинская М.Р., Троицкий В.С., Федосеев Л.И. Радиоизлучение Луны на волне 1,63 см. - Астрон. ж., 1959, т. 36, № 4, с. 643-647.
- Кайдановский Н.Л., Турусбеков М.Т., Хайкин С.Э. Тепловое радиоизлучение Луны. - Труды 5-го Совещ. по космог., 1956, с. 347-355.
- Кайдановский Н.Л., Иханова В.Н., Анушкинский Г.П., Шиврис О.Н. Наблюдения радиоизлучения Луны на волне $\lambda = 2,3$ см при помощи Большого пулковского радиотелескопа. - Радиофизика, 1961, т. 4, № 3, с. 428-432.
- Каменская С.А., Кисляков А.Г., Кротиков В.Д. и др. Наблюдение радиозатмений Луны на миллиметровых волнах. - Радиофизика, 1965, т. 8, № 2, с. 219-226.
- Кисляков А.Г. Результаты экспериментального исследования радиоизлучения Луны в четырехмиллиметровом диапазоне волн. - Астрон. ж., 1961, т. 28, № 3, с. 561-

563. ; То же Новое о Луне, М.Л. изд. АН СССР, 1963, с. 380-386.

- Кисляков А.Г., Кузьмин А.Д., Саломонович А.Е. Радиоизлучение Венеры в 4 мм диапазоне волн. - Астрон. ж., 1962, т. 39, № 3, с. 410-417.
- Кисляков А.Г., Лосовский Б.Я., Саломонович А.Е. Радиоизлучение "морей" и "материков" Луны в миллиметровом диапазоне волн. - Радиофизика, 1963, т. 6, № 1, с. 192-193.
- Кисляков А.Г., Саломонович А.Е. Радиоизлучение экваториальной области Луны в 4 мм диапазоне волн. - Радиофизика, 1963, т. 6, № 3, с. 432-436.
- Корольков Д.В., Парийский Ю.Н., Тимофеева Г.М., Хайкин С.Э. Радиоастрономические наблюдения Венеры с высокой разрешающей способностью. - ДАН СССР., 1963, т. 149, № 1, с. 65-67.
- Корольков Д.В., Парийский Ю.Н., Тимофеева Г.М. Радиоизлучение Юпитера на волне 3,02 см. - Астрон. цирк., 1964, № 283.
- Костенко В.И., Павлов А.В., Шаломичский Г.В., Слыш В.И., Согласнова В.А., Заболотный В.Ф. Яркостная температура планет на волне 1,4 мм. -
- Котельников В.А. и др. Радиолокация планеты Меркурий. - ДАН СССР. 1962, т. 147, № 6, с. 1320.
- Кротиков В.Д., Порфирьев В.А., Троицкий В.С. Разработка метода прецизионного измерения интенсивности поля и эталонирование радиоизлучения Луны на $\lambda = 3,2$ см. - Радиофизика, 1961, т. 4, № 6, 1004-1012. То же Радиофизика, 1961, т. 4, № 4, с. 100.
- Кротиков В.Д., Троицкий В.С. Излучательная способность Луны на сантиметровых волнах. - Астрон. ж., 1962, т. 39, № 6, с. 1089-1093.
- Кротиков В.Д. Некоторые электрические характеристики земных пород и их сравнение с характеристиками по-

верхностного слоя Луны. - Радиофизика, 1962, т. 5, № 6, с. 1057-1061.

Кротиков В.Д., Троицкий В.С. Радиоизлучение и природа Луны. - УФН, 1963, т. 81, вып. 4, с. 589-640.

Кротиков В.Д., Троицкий В.С. Обнаружение потока тепла из недр Луны. - Астрон. ж., 1963, т. 40, № 6, с. 1076-1082. То же - Радиофизика, 1963, № 4, с. 631-633.

Кротиков В.Д., Троицкий В.С. О теплопроводности лунной породы по данным прецизионных измерений радиоизлучения Луны. - Астрон. ж., 1963, 40, № 1, с. 158-160.

Кротиков В.Д., Шуко О.Б. К вопросу о тепловом режиме поверхностного слоя Луны во время лунаций. - Астрон. ж., 1963, 40 № 2, с. 297-303.

Кротиков В.Д. К теории интегрального радиоизлучения Луны. - Радиофизика, 1963, т. 6, № 5, с. 889-896.

Кротиков В.Д. Учет усредняющего действия диаграммы направленности антенны при измерениях радиоизлучения Луны. - Радиофизика, 1965, т. 8, № 3, с. 453-460.

Кротиков В.Д., Шуко О.Б. О тепловом режиме верхнего покрова Меркурия. - Астрон. ж., 1975, 52, № 1, с. 146.

Кротиков В.Д., Шуко О.Б. О тепловом режиме и радиоизлучении Меркурия. Тезисы док. XIII Всесоюзн. конфер. по радиоастрономическим методам исследования солнечной системы. Наукова думка, Киев, 1981, с. 74.

Кузьмин А.Д., Саломонович А.Е. Радиоизлучение Венеры в 8 мм диапазоне волн. - Астрон. ж., 1960, т. 37, № 2, с. 297.

Кузьмин А.Д., Саломонович А.Е. Радиоизлучение Венеры на волне 9,6 см. - Астрон. цирк., 1961, № 221, с. 3-4.

Кузьмин А.Д. Об ионосферной модели Венеры. - Радиофизика, 1963, 6, № 6, с. 1090-1097.

- Кузьмин А.Д., Кларк Б.Дж. Измерение поляризации и распространения яркостной температуры Венеры на волне 10,6 см. - Астрон. ж., 1965, т. 42, № 3, с. 595.
- Кузьмин А.Д., Лосовский Б.Я., Измерение радиоизлучения спутника Юпитера Каллисто. - ДАН СССР, 1973, т. 211, № 4, с. 804-805.
- Кузьмин А.Д., Наумов А.П., Смирнова Т.В. Оценка содержания аммиака в подоблачной атмосфере Сатурна по радиоастрономическим измерениям, Астрон. вестник, 1974, т. 6, № 1, с. 13-18.
- Кутуза Б.Г., Лосовский Б.Я., Саломонович А.Е. Измерение радиоизлучения Меркурия на волне 8 мм. - Астрон. цирк., 1965, № 327, с. 5-7.
- Кутуза Б.Г., Лосовский Б.Я., Саломонович А.Е. Радиоизлучение Сатурна на волне 8 мм. - ДАН СССР, 1965, т. 161, № 6, с. 1301-1302.
- Кутуза Б.Г., Лосовский Б.Я., Саломонович А.Е. Наблюдения радиоизлучения Марса на волне 8 мм. - Астрон. ж., 1966, т. 43, № 1.
- Лосовский Б.Я., Головки В.К. Наблюдения Меркурия на волне 8 мм Астрон. ж., 1967.
- Лосовский Б.Я., Саломонович А.Е. О радиоизлучении и различиях верхнего покрова "морских" и "материковых" областей Луны. - Астрон. ж., 1965, т. 42, в. 2, с. 390-397.
- Матвеев Ю.Т., Сучкин Г.Л., Троицкий В.С. Об изменении плотности лунита в глубине в приповерхностном слое. - Астрон. ж., 1965, т. 42, 4, с. 810-816.
- Милгалиев М.Г. и др. Обнаружение радиоизлучения : пояса радиации. Письма Астрон. ж., 1975, т. 5, № 11, с. 622.
- Наумов А.И. Радиоизлучение Луны и Солнца на волне 1,8 мм. - Радиофизика, 1963, т. 6, № 4, с. 848-849.
- Органская О.И., Альбер Я.И. К вопросу о тепловой исто-

- рии Луны. - Астрон. ж., 1967, т. 44, № 1, с. 168-166.
- Парийский Ю.Н. Атмосфера Юпитера по радионаблюдениям. Астрон. ж., 1971, т. 48, вып. 1, с. 163-165.
- Рядов В.Я., Фурашов Н.И., Шаронов Г.А. Измерение собственного теплового излучения Луны в инфракрасном диапазоне волн. - Астрон. ж., 1964, т. 41, № 1, с. 112-115.
- Саломонович А.Е. Радионизлучение Луны в 8 мм диапазоне волн. - Астрон. ж., 1958, т. 35, вып. 1, с. 129-135.
- Саломонович А.Е., Лосовский Б.Я. Наблюдения распределения радиояркости по диску Луны на волне 0,8 см. - Астрон. ж., 1962, т. 39, вып. 6, с. 1074-1082.
- Саломонович А.Е. Тепловое радионизлучение Луны в сантиметровом диапазоне волн и некоторые характеристики ее поверхностного слоя. - Астрон. ж., 1965, т. 42, вып. 2, с. 79-86.
- Смирнова, Т.В., Кузьмин А.Д. Оценка содержания водяного пара и аммиака в нижней атмосфере Венеры по радиолокационным измерениям. - Астрон. ж., 1974, т. 51, № 3, с. 607-610.
- Соболева Н.С. Измерение поляризации радионизлучения Луны на волне 3,2 см при помощи Большого пулковского радиотелескопа. - Астрон. ж., 1962, т. 39 № 6, с. 1124-1126.
- Соболева Н.С., Тимофеева Г.М. Результаты наблюдения Юпитера в Пулковке на волне 3,95 см. - Астрон. ж., 1969, т. 46, вып. 4, с. 872-876.
- Стержнева К.М., Троицкий В.С. Фазовая зависимость радионизлучения Луны на волне 3,2 см. - Радиофизика, 1961, т. 4, № 4, с. 600-607; То же Moon Prog. Sumr. N14, 1962.
- Троицкий В.С. К теории радионизлучения Луны. - Астрон. ж., 1954, т. 31, 6, с. 511-528.
- Троицкий В.С., Злинская М.Р. Определение некоторых

свойств поверхностных слоев Луны по ее радиоизлучению на волне 3,2 см. - Астрон. ж., 1955, т. 32, № 6, с. 550-554.

Троицкий В.С. Радиоизлучение Луны и природа ее поверхности. - Труды 5-го Совещания по космогонии, М., 1956, с. 225-346.

Троицкий В.С., Цейтлин Н.М. Метод измерения диэлектрической постоянной лунной породы. - Радиофизика, 1960, т. 3, № 6, с. 1122-1123.

Троицкий В.С. Радиоизмерение диэлектрической проницаемости и плотности материала верхнего покрова Луны. - Астрон. ж., 1961, т. 38, с. 1001-1002.

Троицкий В.С. Радиоизлучение Луны, физическое состояние и природа ее поверхности. Известия комиссии по физике планет. - 1961, № 3, с. 15-30.

Троицкий В.С. Радиоизлучение Луны, физическое состояние и природа ее поверхности. - В кн.: Новое о Луне. М.-Л. Издат. АН, 1963, с. 354-366.

Троицкий В.С., Цейтлин Н.М. Радиоастрономические методы абсолютных измерений интенсивности сигнала, калибровки антенн и радиотелескопов на сантиметровых волнах. - Радиофизика, 1961, т. 4, № 3, с. 393-420.

Троицкий В.С. Новая возможность определения плотности поверхностных пород Луны. - Радиофизика, 1962, т. 5, № 5, с. 885-891.

Троицкий В.С. Природа и физические состояния верхнего покрова Луны: - Астрон. ж., 1962, т. 39, 1, с. 73-78.

Троицкий В.С. О природе вещества лунных морей и материков. - Радиофизика, 1963, 4, с. 631-633.

Троицкий В.С. К вопросу о неоднородности свойств верхнего покрова Луны в глубину и по поверхности. - Астрон. ж., 1964, т. 41, 4, с. 724-732.

Троицкий В.С. К теории радиоизлучения Венеры и Марса. - Радиофизика, 1964, т. 7, № 2, с. 208-215.

Troitskij V.S. Investigation of the Surfaces of the Moon and Planets by the Thermal Radiation. - Radio Sci., 1965, N12, 1585.

Троицкий В.С. Определение температурной зависимости теплопроводности лунита. - Радиопизика, 1967, т. 10, № 8, с. 1051-1057.

Troitskij V.S. Thermal conductivity of lunite as dependent on temperature. - Nature, 1967, v.213, 688-69.

Троицкий В.С. Результаты исследования Луны по ее собственному излучению. - Радиопизика, 1967, т. 10; № 9-10, с. 1286-1282.

Troitskij V.S., Burov A.B., Alyoshina T.N. Influence of the Temperature Dependence of Lunar Material Properties on the Spectrum of the Moon's Radio Emission. - ICARUS, 1968, v.8, N3, p.423-433.

Troitskij V.S. The Problem of the Thermal Conductivity Equation in the Presence of Radiative Energy Transfer. - Philos. Trans. Roy. Soc. A, 1969, v.264, 145-149.

Troitskij V.S., Bondar' L.N., Zelinskaya M.R., Strezhneva K.M. Comparison of the chemical composition of lunar surface material determined by radio-astronomical observations with the results of chemical analysis obtained by Surveyor. - Radio Sci., 1970, v.5, N2, p.247-251.

Троицкий В.С., Тихонова Т.В. Тепловое излучение Луны и

физические свойства ее верхнего покрова. - Радиофизика, 1970, т. 13, № 9, с. 1279-1311.

Троицкий В.С. Эффективная толщина радиоактивного слоя Луны. - Астрон. ж., 1970, т. 4, № 4, с. 222-225. То же в Space Research XI Berlin, 1971.

Троицкий В.С. О возможностях исследования свойств вещества Марса по его радиоизлучению. - Астрон. ж., 1970, т. 47, № 2, с. 384-391. То же Radio Sci., 1970, v.5, N2, p.481-486.

Троицкий В.С., Тихонова Т.В. Результаты исследования поверхностного слоя Луны по ее собственному излучению. - Современное представление о Луне. - М.: Наука, 1972, с. 46-64.

Троицкий В.С., Бондарь Л.Н., Стрженева К.М. Вариационные диаграммы диэлектрико-химических свойств силикатных пород. - ДАН СССР, 1973, т. 208, № 4, с. 837-840.

Троицкий В.С., Орнатская О.И., Цейтлин Н.М. и др. Расчеты тепловой истории Луны при наиболее вероятных концентрациях радиоактивных элементов. - ДАН СССР, 1976, т. 230, № 6, с. 1445-1447.

Троицкий В.С., Орнатская О.И., Рязанцева И.П. Исследование тепловой истории Марса. - ДАН СССР, 1978, т. 243, № 3, с. 600-602.

Тихонова Т.В., Троицкий В.С. Влияние потока тепла из недр Луны на ее радиоизлучение при изменении свойств вещества в глубину - Астрон. ж., 1969, т. 46, № 1, с. 159-171.

Тихонова Т.В., Троицкий В.С. Спектр коэффициента отражения радиоволн от поверхности Луны при изменении свойств вещества в глубину. - Астрон. ж., 1969, т. 46, № 6, с. 1324-1328.

Тихонова Т.В. К вопросу о дифракционной поправке при измерениях методом "искусственной Луны". - Радиофизика, 1969, т. 12, № 8, с. 1121-1131.

- Федосеев Л.И., Лубяко Л.В., Кукин Л.М. Измерение фазовой зависимости радиоизлучения Луны на субмиллиметровых волнах. - Радиофизика, 1968, т. 11, с. 807-812.
- Федосеев Л.И. Радиоизлучение Луны и Солнца на волне 1,3 мм. - Радиофизика, 1963, т. 6, № 4, с. 656-659.
- Цейтлин Н.М. К методике прецизионных измерений с помощью "искусственной Луны". - Радиофизика, 1963, т. 6, № 6, с. 1265-1268.
- Цейтлин Н.М. К вопросу об измерении параметров антенн по радиоизлучению черного диска, расположенного в зоне Френеля. - Радиофизика, 1964, т. 7, № 3, с. 571-576.
- Шмулевич С.А., Троицкий В.С., Зетинская М.Р. и др. Диэлектрические свойства горных пород на частоте 500 МГц. - Физика Земли, 1971, № 12, с. 68-76.
- Шмулевич С.А., Троицкий В.С. О зависимости диэлектрических свойств горных пород от их объемного веса. - ДАН СССР, 1971, т. 201, № 3, с. 593-594, То же J. Geophys. Res., 1973, 73, N10, p. 6933-6935.
- Щуко О.Б. К вопросу о неоднородности свойств лунита в глубину в приповерхностном слое. - Астрон. ж., 1969, т. 46, № 6, с. 1264-1269.
- Jones D. СВЧ температура Венеры. - Planet. and Space Sci., 1961, v. 5, N2, p. 166.
- Sagan C. Структура нижней атмосферы Венеры. - Icarus, 1962, v. 1, N2, p. 151.
- Piddington J.H., Minnett H.C. Радиоизлучение Луны. - Aust. J. Sci. Research, 1949, v. 2, p. 63-70.
- Jaeger J.G. О тепловых параметрах верхнего покрова Луны. - Austr. J. Phys., 1953, v. 6, p. 10-18.
- Дата поступления статьи 24 апреля 1983 г.

Всеволод Сергеевич Троицкий

РАДИОНАБЛЮДЕНИЯ ПЛАНЕТ И СПУТНИКОВ

Подписано в печать 09.06.89 г. МЦ 00374. Формат 60x84/16
Бумага писчая №1. Печать офсетная. Объем 3,66 усл.печл.
Тираж 120. Заказ 2976. Бесплатно.

Отпечатано на роталпринте Горьковского научно-исследова-
тельского радиотехнического института, 603600, Горький,
ГСП-51, ул. Лядова, 25/14, тел. 38-80-91, доб. 5-09