

РАЗВИТИЕ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПЛАНЕТ В СОВЕТСКОМ СОЮЗЕ

*В. А. Котельников, О. Н. Ржига, Ю. Н. Александров, В. М. Дубровин,
В. А. Морозов, Г. М. Петров, А. М. Шаховской, А. В. Францессон*

Проблемы современной радиотехники и электроники.
Под ред. В. А. Котельникова. М.: Наука, 1980

Введение

Радиолокационные исследования планет являются новым направлением наблюдательной астрономии. Непосредственным толчком к началу радиолокационных исследований планет послужила необходимость в уточнении астрономической единицы¹⁾, возникшая в связи с организацией межпланетных полетов. Первой мишенью была выбрана Венера, которая ближе других планет подходит к Земле. На первый взгляд может показаться, что для уточнения астрономической единицы было бы удобнее использовать Луну, поскольку радиолокация Луны проводится с 1946 г. Однако расстояние между Землей и Луной непосредственно не выражается через астрономическую единицу.

Основная трудность радиолокационных исследований планет заключена в огромной величине межпланетных расстояний. Так, расстояние между Землей и Венерой изменяется в пределах от 40 до 260 млн км. Поскольку интенсивность отраженного сигнала у приемника убывает пропорционально четвертой степени расстояния, в первых экспериментах можно было надеяться обнаружить отраженный сигнал только при минимальном расстоянии — вблизи нижнего соединения Венеры, которое повторяется раз в 19 месяцев. Даже в этом случае, чтобы перейти от Луны к Венере, чувствительность (энергетический потенциал) радиолокатора необходимо увеличить примерно в 10 млн раз, а для обнаружения сигнала, отраженного Марсом, еще в 100 раз (см. рис. 1). Поэтому обнаружение отраженного сигнала можно было осуществить только на определенном этапе развития антенной техни-

¹⁾ Единица расстояния в астрономии, равная среднему расстоянию Земли от Солнца.

ки, техники передающих и приемных устройств, методов выделения сигналов, на что потребовалось около 15 лет.

Впервые эксперимент по радиолокации Венеры, считавшийся первоначально удачным, был выполнен в феврале 1958 г. в Массачусетском технологическом институте группой Р. Прайса [1]. В следующем нижнем соединении планет в сентябре 1959 г. радиолокация Венеры была проведена также и в радиоастрономической обсерватории Джодрел-Бэнк Дж. Эвансом и Г. Тейлором [2]. Как выяснилось впоследствии, результаты этих экспериментов оказались ошибочными, так как случайные выбросы шумов приемника были приняты за отраженный сигнал. Радиолокационная установка Массачусетского технологического института (Милстоун-Хил) имела в то время недостаточную чувствительность.

Создание радиолокационной установки для исследования планет

В середине 1960 г. исследования по подготовке к радиолокации Венеры были начаты в Институте радиотехники и электроники АН СССР. С тех пор цикл работ «Радиолокация планет» является одним из основных направлений научных исследований, ведущихся в Институте.

Для осуществления радиолокации Венеры было решено использовать антенну и передатчик Центра дальней космической связи, строившегося в то время в Крыму под Евпаторией. За оставшиеся до ближайшего нижнего соединения полгода был создан радиолокатор. Структура радиолокатора и методика радиолокационных наблюдений были разработаны О. Н. Ржигой. Работу по созданию радиолокатора удалось выполнить благодаря энтузиазму всего коллектива участников. Решающая роль в создании коллектива и организации радиолокационных наблюдений принадлежит А. М. Шаховскому.

Приступая к радиолокационным исследованиям Венеры, надо было разработать измерительную аппаратуру, параметры которой были бы согласованы с параметрами отраженного сигнала. Последние определяются физическими характеристиками планеты, о которых в то время практически ничего не было известно. Первые эксперименты по радиолокации Венеры в США и Англии [1, 2], оказавшиеся впоследствии неудачными, приводили к оценкам отражательной способности планеты, отличающимся в 40 раз. В отношении вращения Венеры, от которого зависит расширение спектральной линии отраженных волн, в то время существовали самые противоречивые предположения. В дополнение к этому неопределенность в расстоянии между Землей и Венерой согласно различным оценкам, основанным на данных оптических наблюдений, достигала 100 тыс. км.

Ввиду неопределенности параметров отраженный сигнал предполагалось регистрировать на магнитную ленту, что позволяло подобрать оптимальные параметры измерительной аппаратуры при многократном

воспроизведении записей. Система магнитной записи с использованием опорного колебания для точного отсчета времени при ее воспроизведении была разработана В. М. Дубровиным [3].

Для обнаружения слабого отраженного сигнала на фоне флуктуационных шумов приемной аппаратуры нужно было обеспечить длительное усреднение (до единиц и десятков часов при очень слабом сигнале). Обнаружение отраженного сигнала и измерение его частоты и энергии осуществлялись с помощью многоканального (10–20 каналов) анализатора спектра, разработанного В. А. Морозовым при участии З. Г. Труновой [4]. Измерение энергии сигнала основывалось на том, что суммарное время превышения огибающей флуктуационного шума и сигнала некоторого порогового уровня в каждом частотном канале анализатора растет пропорционально энергии сигнала.

В. И. Бунимовичем и В. А. Морозовым показано, что при соответствующих условиях примененный метод измерения энергии слабого сигнала практически эквивалентен оптимальному приему [5]. Этот анализатор был изготовлен под руководством Г. А. Подоприморы.

Излучение передатчика имело вид периодической последовательности посылок и пауз равной длительности, чтобы осуществить радиометрический метод приема. При приеме время превышения порогового уровня определялось отдельно для посылок и пауз и бралась их разность, пропорциональная энергии сигнала. Так исключались самопроизвольное изменение усиления приемного тракта и дрейф нуля пороговых схем.

Необходимость в магнитной записи выявилась в первых наблюдениях Венеры в апреле 1961 г. [6, 7]. При непосредственном анализе, проводившемся одновременно с приемом отраженного сигнала, расстояние было измерено с неоднозначностью, определяемой периодом модулирующего колебания. Из возможных значений расстояния до Венеры вначале было выбрано наиболее близкое к полученному ранее астрономическими методами, что оказалось впоследствии неверным. Полосы фильтров в анализаторе спектра, которые были выбраны исходя из предполагавшейся скорости вращения Венеры, оказались слишком широкими, что приводило к проигрышу в отношении сигнал–шум (которое и так было невелико) и оценке ширины спектра отраженного сигнала, которая не была подтверждена впоследствии. Однако анализ магнитных записей, проведенный вскоре после радиолокационных наблюдений при использовании узкополосных электромеханических фильтров, разработанных М. Г. Голубцовым [3], позволил раскрыть неоднозначность в измеренном расстоянии по доплеровскому смещению центральной частоты спектра и правильно оценить его ширину.

Астрономические эфемериды позволяют вести измерения запаздывания и доплеровского смещения отраженного сигнала к измерению отклонений этих величин относительно эфемеридных, вычисленных на основе существующей теории движения планет, что резко сокращает интервал измерений. С этой целью были разработаны специаль-

ные устройства, обеспечивающие воспроизведение расчетных значений запаздывания и доплеровского смещения [3]. Доплеровский генератор позволял изменять несущую частоту сигнала в диапазоне ± 50 кГц с дискретностью 1 Гц. Расчетное запаздывание воспроизводилось счетчиком числа периодов некоторого колебания стабильной частоты. Устройство позволяло отмерять временные интервалы длительностью до 700 с с дискретностью 0,5 мс. Текущие значения частоты и запаздывания устанавливались вручную по заранее рассчитанным таблицам. Программное устройство для отсчета временных интервалов и автоматического управления системами радиолокатора при излучении и приеме сигналов было разработана Г. М. Петровым.

Передатчик Центра дальней космической связи предназначен для работы в режиме непрерывного излучения, что удобно для спектральных измерений. Чтобы иметь возможность измерять расстояние и распределение энергии отраженных волн по времени запаздывания, нужно было ввести модуляцию. Измерения расстояния при радиолокации Луны и в первых опытах по радиолокации Венеры в США и Англии проводились с помощью амплитудной импульсной модуляции излучения; применение ее в передатчике непрерывного излучения привело бы к снижению средней излучаемой мощности. Периодическая манипуляция амплитуды или частоты излучения, использовавшаяся в 1961 г., не удовлетворяла по точности и однозначности измерений. Поэтому в последующих наблюдениях была выбрана линейная частотная модуляция, при которой частота излучаемого колебания изменяется по пилообразному закону, а частота гетеродина в приемнике повторяет этот закон с задержкой на прогнозируемое время запаздывания отраженного сигнала. Отклонение в запаздывании сигнала от прогнозируемого значения переводится при этом в пропорциональное смещение частоты сигнала на выходе приемника, которое можно измерить с помощью многоканального анализатора спектра. Система обработки сигнала при этом получается более простой, чем для других видов модуляции (амплитудной импульсной или фазокодовой).

Применение линейной частотной модуляции оказалось очень эффективным после того, как в 1962 г. Б. И. Кузнецовым и И. В. Лишиным был создан специальный генератор, обеспечивающий строгую линейность изменения частоты [8]. Модулированная последовательность синтезируется из достаточно коротких отрезков синусоид возрастающей или убывающей частоты, срачиваемых в моменты одновременного перехода колебаний через нуль. Исходные гармонические колебания получают дробно-частотным преобразованием от высокостабильного задающего генератора. Этот метод обеспечивает строгую линейность изменения частоты на периоде модулирующей последовательности и высокую точность повторения ее формы, что было бы невозможно получить с помощью обычного частотного модулятора.

Вследствие эффекта Доплера движение планеты относительно антенны радиолокатора вызывает, помимо изменения средней частоты

принимаемого сигнала, искажение формы (сжатие или растяжение) модулирующей последовательности. Предложен оригинальный способ учета этих искажений, состоящий в том, что в частоту задающего генератора, служащего для синтезирования модулирующей последовательности, вводится поправка на ожидаемое доплеровское смещение. При этом модулирующая последовательность оказывается предварительно искаженной так, чтобы в момент приема эти искажения были скомпенсированы движением планеты.

В 1962 г., когда чувствительность радиолокационной установки была повышена в 6 раз, главным образом за счет применения на входе приемного устройства парамагнитного усилителя на охлаждаемом гелием кристалле рубина, разработанного А. В. Францессоном под руководством М. Е. Жаботинского [9], радиолокатор Центра дальней космической связи был самым чувствительным. Но затем в США были созданы новые радиолокаторы на базе больших антенн, работающие на волнах 3,8; 12,5; 23 и 70 см. Проигрывая в дальности действия, радиолокатор Центра дальней космической связи благодаря совершенствованию аппаратуры и методики [10] не уступает зарубежным установкам в точности измерений. К тому же он отличается длиной волны (39 см).

Применение частотной модуляции с девиацией до 128 кГц обеспечивает при радиолокации Венеры точность измерения расстояния лучше 1 км при дальности до 100 млн км (в 1961 г. точность измерения расстояния составила 3000 км при дальности до 50 млн км). Точность спектральных измерений при наблюдении Венеры составляет 0,05 Гц (на частоте около 10^9 Гц!) или при пересчете к радиальной скорости планеты 1 см/с.

Высокая точность спектральных измерений обеспечивается применением электронной вычислительной машины для спектрального анализа отраженного сигнала [11, 12]. При этом отпадают трудности изготовления большого числа узкополосных фильтров, имеющих идентичные и очень стабильные частотные характеристики. Решающий вклад в развитие цифровых методов спектральных измерений и создание комплекса цифровой обработки радиолокатора сделан Ю. Н. Александровым [13]. Специализированное вычислительное устройство, служащее для наблюдения за текущим спектром отраженного сигнала во время приема для оценки его формы, интенсивности и частоты, разработано Г. М. Петровым.

Усовершенствованный комплекс аппаратуры для измерения времени запаздывания отраженного сигнала разработан А. Л. Зайцевым и А. Ф. Хасяновым под руководством Г. М. Петрова [14, 15]. Уникальные устройства обеспечивают воспроизведение эфемеридных значений запаздывания с точностью 1 мкс на интервале до 1000 с и доплеровского смещения с точностью 0,01 Гц в диапазоне ± 100 кГц. Доплеровский генератор осуществляет интерполяцию расчетной кривой доплеровского смещения полиномом 3-й степени на интервале до 20 мин.

Много труда в изготовление, наладку и обслуживание аппаратуры радиолокатора, разработанной в ИРЭ, вложили Р. А. Андреев, Л. В. Апраксин, С. М. Барабошкин, В. И. Каевицер, Ю. В. Филин, А. Г. Мелихов, Е. Ф. Кущенко, П. В. Кузнецов, В. К. Сорокин, А. Т. Тагаевский, С. М. Голубев, А. С. Палатов.

Наблюдения планет

Наблюдения Венеры в 1961 г. после раскрытия неоднозначности позволили уточнить значение астрономической единицы и получить оценки отражательной способности и нижнего предела периода вращения Венеры [7].

В следующем нижнем соединении Венеры в 1962 г. благодаря повышению чувствительности радиолокационной установки стало возможным провести измерения расстояния до Венеры на протяжении двух месяцев и получить важные физические характеристики планеты [16]. Определены период и направление вращения Венеры. Впервые получено распределение энергии отраженных волн по времени запаздывания с высоким разрешением, позволившее установить природу отражающей поверхности Венеры. За счет более простой процедуры обработки отраженного сигнала при линейной частотной модуляции это удалось сделать на два года раньше, чем американским исследователям, использующим амплитудную импульсную или фазокодированную модуляцию излучения. В 1962 г. изучались вариации отражательной способности и деполяризации волн при отражении от поверхности Венеры [17].

Повышение чувствительности радиолокатора сделало возможным в 1962 г. впервые обнаружить сигнал, отраженный Меркурием, который находится дальше и имеет меньшие размеры, чем Венера. Независимая проверка астрономической единицы при радиолокации Меркурия подтвердила значение, полученное из наблюдений Венеры [18].

В 1963 г. проводились первые эксперименты по обнаружению сигналов, отраженных Марсом [19] и Юпитером [20]. Быстрое вращение этих планет приводит к сильному расширению спектральной линии отраженного сигнала, затрудняя его обнаружение. Юпитер — самая удаленная из планет, для которой можно было надеяться обнаружить отраженный сигнал при достигнутой чувствительности радиолокационной установки. В январе-феврале 1966 г. были проведены совместные с английской обсерваторией Джодрел-Бэнк радиолокационные наблюдения Венеры. Посылаемое из Центра дальней космической связи монохроматическое излучение после отражения Венерой принималось большим радиотелескопом обсерватории Джодрел-Бэнк, где записывалось на магнитную ленту. Затем эти записи обрабатывались в ИРЭ с помощью ЦВМ БЭСМ-2М [21]. Высокая точность спектральных измерений, достигнутая за счет применения ЦВМ, а также возможность длительного усреднения результата, появившаяся благодаря тому, что передатчик

находился за горизонтом и не было необходимости выключать его на время приема, позволили обнаружить в спектре отраженного Венерой сигнала детали, обусловленные локальными областями поверхности планеты, имеющими на радиоволнах более высокую отражательную способность, чем окружающая местность. По перемещению деталей в спектре сигнала, полученного в двух нижних соединениях, определены координаты этих «ярких» областей и произведено уточнение периода вращения и ориентации оси вращения Венеры.

С 1969 г. с помощью радиолокационной установки Центра дальней космической связи проводятся регулярные измерения расстояния и радиальной скорости Венеры с целью прогнозирования положения планеты на завершающем этапе полета к ней межпланетных станций. Создание комплекса цифровой обработки отраженного сигнала позволило оперативно выдавать результаты измерений.

За 10 лет (с 1961 г.) за счет повышения мощности передающего устройства, усовершенствования антенны, приемника и методов обработки отраженного сигнала чувствительность радиолокационной установки возросла в 70 раз (рис. 1). Это позволило во время Великого противостояния 1971 г. провести измерения расстояния до Марса.

Полученные в период с 1961 по 1977 г. данные о расстоянии и радиальной скорости Венеры [22–24] и Марса представляют ценнейший материал для уточнения теории движения планет.

С помощью комплекса цифровой обработки радиолокатора был проведен анализ радиосигналов спускаемого аппарата межпланетной станции «Венера-7» на этапе посадки его на поверхность Венеры. При этом удалось установить, что спускаемый аппарат благополучно достиг поверхности Венеры, а также принять на Земле передававшиеся данные, хотя мощность принимаемого сигнала после посадки упала в несколько десятков раз [25].

Уточнение астрономической единицы длины

Основным результатом радиолокационных наблюдений Венеры, имеющим первостепенное значение для космонавтики, является уточнение астрономической единицы длины. Наблюдения параллактического смещения малой планеты Эрос, являвшиеся до этого основным способом определения астрономической единицы, приводили к оценкам, отличающимся на несколько сот тысяч километров (рис. 2) [26], что грозило неизбежным промахом при полетах станций.

В классических теориях движения планет, построенных на основе оптических (угловых) измерений, астрономическая единица является масштабным множителем. Поэтому, измерив расстояние до планеты в километрах через запаздывание отраженного сигнала и скорость света, величина которой известна с высокой точностью, и поделив его на величину этого же расстояния в долях астрономической единицы,

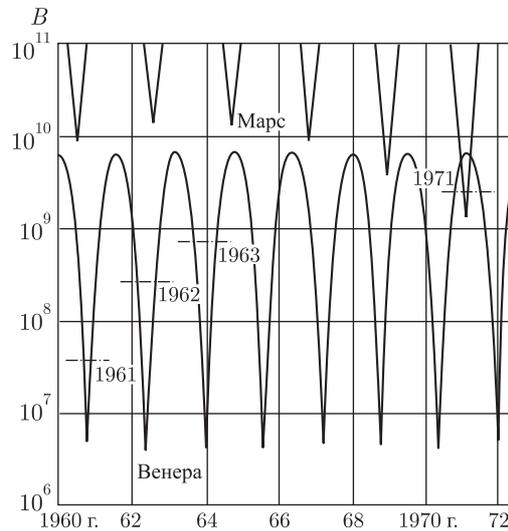


Рис. 1. Необходимое увеличение чувствительности (энергетического потенциала) B радиолокационной установки для осуществления наблюдений Венеры и Марса по сравнению с Луной. Колебания отражают изменения расстояния от Земли. Наиболее удобны для наблюдений узкие интервалы вблизи нижних соединений (для Венеры) и противостояний (для Марса), когда планеты ближе всего подходят к Земле. Штрихпунктирной линией показана достигнутая чувствительность радиолокационной установки Центра дальней космической связи

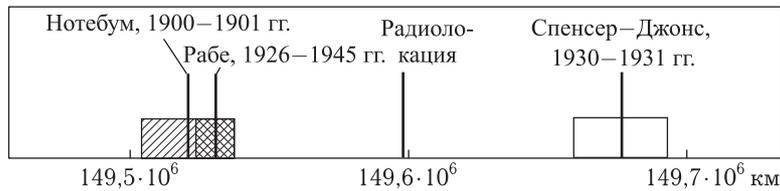


Рис. 2. Результаты определения астрономической единицы по параллактическому смещению малой планеты Эрос и радиолокационным наблюдениям. Оценка ошибки радиолокационного значения не могла быть показана на рисунке, так как она меньше толщины линии

можно было найти величину астрономической единицы в километрах. Это сразу уточняло все расстояния в Солнечной системе.

Значения астрономической единицы, полученные из радиолокационных наблюдений 1961 и 1962 гг. в Советском Союзе, Англии и США, приведены в таблице.

Эти определения астрономической единицы хорошо согласуются между собой (на рис. 2 их нельзя показать по отдельности, так как они все сливаются в одну линию).

В большинстве случаев измерялось время запаздывания отраженного сигнала. В некоторых случаях использовались измерения доплеровского смещения отраженного сигнала, которое (так же, как и запаздывание) пропорционально величине астрономической единицы.

Таблица 1. Определение астрономической единицы (скорость света 299 792,5 км/с)

Год наблюдения	Радиолокационная установка	Длина волны, см	Астрономическая единица, км
1961	Центр дальней космической связи, ИРЭ [7, 6, 27]	39	149 509 300 ± 650
1961	Джодрел-Бэнк, Манчестерский университет [28]	74	149 601 000 ± 5000
1961	Милстоун-Хил, Массачусетский технологический институт [29]	68	149 598 000 ± 300
1961	Голдстоун, Лаборатория реактивного движения [30]	12,5	149 598 600 ± 250
1962	Центр дальней космической связи, ИРЭ [16]	39	149 597 900 ± 250
1962	Джодрел-Бэнк, Манчестерский университет [31]	73	149 596 600 ± 900
1962	Джикамарка, Национальное бюро стандартов [32, 33]	600	149 597 400 ± 600

Измерения проводились в широком диапазоне длин волн: крайние значения рабочей волны отличаются почти в 50 раз. Результаты определений показали на отсутствие видимой связи между длиной волны и величиной астрономической единицы, свидетельствуя о том, что возможное влияние ионизации межпланетной среды лежит в пределах ошибок измерений.

До начала радиолокационных измерений наиболее достоверным считалось значение астрономической единицы $149\,527\,000 \pm 10\,000$ км, полученное Э. Рабе в 1950 г. из наблюдений движения малой планеты Эрос в 1926–1945 гг. [34]. С ним согласовывалось значение астрономической единицы $149\,545\,000 \pm 20\,000$ км, полученное в 1960 г. по измерениям радиальной скорости автоматической межпланетной станции «Пионер-5» [35]. Как показывают радиолокационные данные, эти значения на 50–70 тыс. км меньше истинного. Уже недавно Э. Рабе сообщил, что им обнаружена ошибка, после устранения которой наблюдения Эроса дают $149\,598\,000 \pm 2500$ км [36] и не противоречат радиолокационным определениям астрономической единицы.

В 1969 г. опубликованы результаты определения астрономической единицы по наблюдениям на годичном интервале доплеровского смещения линии водорода в спектре внеземного радиоисточника. Полученное

значение астрономической единицы $149\,588\,000 \pm 10\,000$ км [37] также подтверждает радиолокационные определения.

XII Генеральная ассамблея Международного астрономического союза в 1964 г. рекомендовала радиолокационное значение астрономической единицы для использования в астрономических ежегодниках [38].

Уточнение астрономической единицы сделало возможным вывод искусственных спутников к планетам и доставку межпланетных станций в заданный район их поверхности. Если бы при полете станции «Венера-4», впервые опустившейся в атмосферу Венеры, было использовано значение астрономической единицы, считавшееся до проведения радиолокационных измерений наиболее достоверным, то это привело бы к промаху в три радиуса Венеры.

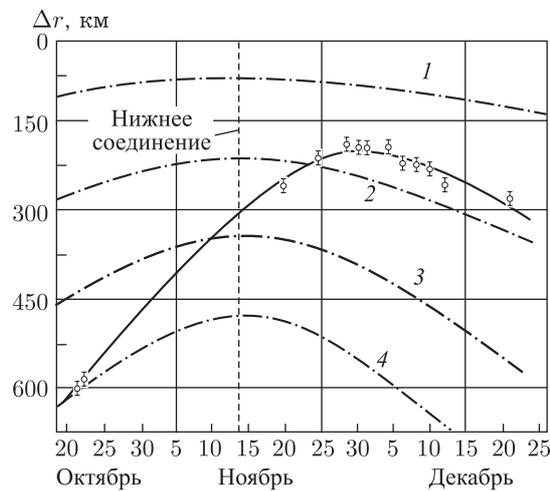


Рис. 3. Разность измеренного и эфемеридного значений расстояния по наблюдениям Венеры в 1962 г. В расчетах принимались: астрономическая единица $A = 149\,599\,300$ км, радиус Венеры 6100 км. Этим значениям соответствует: $\Delta r = 0$. Штрихпунктирные кривые — изменение этой разности при A , отличном от принятого при расчете эфемерид: 1 — $A = 140\,599\,000$ км; 2 — $149\,598\,500$; 3 — $149\,598\,000$; 4 — $149\,597\,500$. Сплошная линия (по экспериментальным точкам) соответствует $A = 149\,597\,900$ км, поправке к эфемеридной разности долгот Венеры и Земли $+0,5''$ и радиусу Венеры 6020 км

Совместное уточнение астрономических постоянных

В то же время радиолокационные наблюдения показали, что и после внесения поправки в величину астрономической единицы остаются значительные регулярные расхождения между фактическим и эфемеридным положением Венеры относительно Земли, достигающие нескольких сот километров. На рис. 3, на котором показана раз-

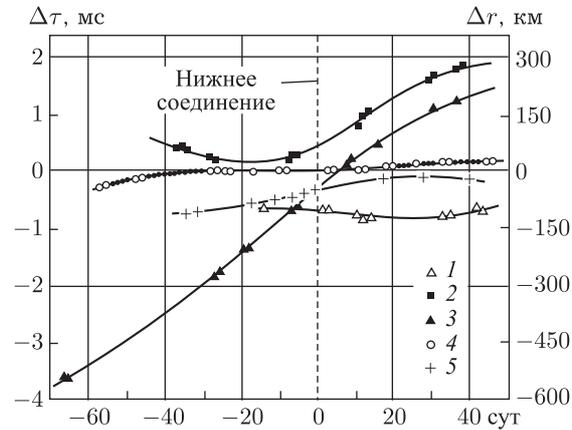


Рис. 4. Отклонения измеренных значений запаздывания отраженных сигналов от значений, вычисленных на основе теории Ньюкомба с поправками Данкомба. По наблюдениям 1969 (1), 1970 (2), 1972 (3), 1975 (4) и 1977 (5) гг.

На правой шкале показаны соответствующие отклонения расстояния

ность измеренного и эфемеридного расстояний по наблюдениям Венеры в 1962 г., это проявляется в несовпадении экспериментальных точек ни с одной из штриховых кривых, вычисленных в предположении, что только значение астрономической единицы отличается от принятого при расчете эфемерид. Основная часть этих расхождений может быть устранена, если предположить, что разность гелиоцентрических долгот Венеры и Земли отличается на $+0,5''$ относительно эфемеридного значения, вычисленного по теории Ньюкомба с учетом поправок Данкомба к элементам орбиты Венеры [16].

Последующие наблюдения подтвердили наличие этих расхождений (рис. 4). Аналогичные расхождения имеются и в положении Марса (рис. 5).

В Советском Союзе и США были поставлены исследования по одновременному уточнению нескольких астрономических постоянных на основании данных радиолокационных наблюдений. Г. М. Петровым [39] были использованы данные радиолокационных наблюдений Венеры в Советском Союзе за 1962 и 1964 гг. Значение астрономической единицы получилось равным $149\,597\,890 \pm 100$ км (при величине скорости света $299\,792,5 \pm 0,1$ км/с [40])²⁾. Одновременно получены радиус Венеры, поправка к эфемеридной разности долгот Венеры и Земли и оценены возможные поправки к эксцентриситетам Венеры и Земли.

²⁾ Последние определения скорости света ($299\,792\,456,2 \pm 1,1$ м/с [41]) дают значение $149\,597\,860 \pm 90$ км, что практически совпадает с приведенной выше оценкой.

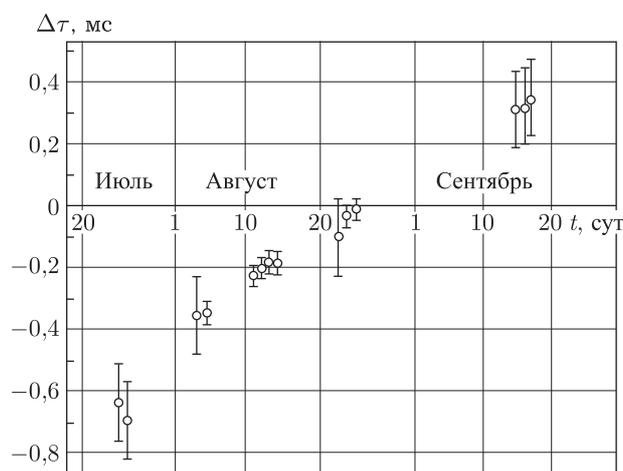


Рис. 5. Разность измеренного и эфемеридного значений времени распространения сигнала по наблюдениям Марса в 1971 г. В расчетах значение астрономической единицы принималось равным 149 507 900 км. Каждые 100 мкс соответствуют 15 км расстояния

Впоследствии работа по уточнению орбит Земли и Венеры проводилась под руководством Э. Л. Акима [42] и М. Д. Кислика [43] и привела к построению теории движения планет, позволяющей прогнозировать взаимное расстояние этих планет значительно лучше, чем обеспечивает аналитическая теория Ньюкомба с поправками Данкомба.

В США эта работа в наибольшем объеме была выполнена в Линкольновской лаборатории Массачусеттского технологического института под руководством И. Шапиро [44]. Для уточнения астрономических постоянных были использованы данные радиолокационных наблюдений Венеры и Меркурия, полученные как в США, так и в СССР, и данные оптических наблюдений Морской обсерватории США за большой отрезок времени. Значение астрономической единицы, выраженное в световых секундах и, следовательно, свободное от ошибки в скорости света, получилось равным $499,004\,786 \pm 0,000\,005$ с. При величине скорости света $299\,792\,456,2 \pm 14$ м/с это дает $149\,597\,870,5 \pm 1,6$ км (ошибка определялась по внутренней сходимости измерений и потому носит формальный характер). Одновременно получены элементы орбит Меркурия, Венеры и центра масс системы Земля–Луна, радиусы Меркурия и Венеры, а также массы внутренних планет.

Радиолокация позволила определить радиус поверхности Венеры, отражающей радиоволны. Оптические методы, например наблюдения покрытий Регула, дают радиус верхней кромки облачного слоя планеты. Согласно оценке Вокулера [45], он равен 6120 ± 8 км.

Радиус поверхности планеты получается одновременно с астрономическими постоянными как разность расстояний до центра масс

планеты и до ближайшего к Земле участка поверхности. Расстояние до поверхности дается радиолокационными измерениями, положение центра масс определяется уточненной теорией движения планет.

Используя наблюдения 1962 и 1964 гг., Г. М. Петров получил значение радиуса поверхности Венеры 6046 ± 15 км [39]. Анализ данных, полученных до 1969 г., проведенный И. Шапиро, дал значение $6050,0$ км с формальной среднеквадратичной ошибкой $0,3$ км [46].

В 1976 г. XVI Генеральная ассамблея МАС приняла новую систему астрономических постоянных, в которой для скорости света (c), астрономической единицы (A) и радиуса Венеры ($R_{\text{в}}$) утверждены значения:
 $c = 299\,792\,458$ м/с, $A = 499,004\,782 c$ ($A = 149\,597\,870$ км),
 $R_{\text{в}} = 6052$ км.

Значения этих величины, полученные в СССР [43] при совместной обработке радиолокационных и оптических данных, включая 1970 г., равны: $A = 499,004\,774\,6 \pm 0,000\,002\,2c$ (что для принятой МАС скорости света дает $A = 149\,597\,868,0 \pm 0,6$ км), $R_{\text{в}} = 6052,3 \pm 0,3$ км.

Определение элементов вращения Венеры

Величина периода и направление вращения Венеры были определены по расширению спектральной линии отраженного сигнала, обусловленного тем, что отдельные участки поверхности планеты имеют разную величину лучевой скорости относительно наземного наблюдателя. Величина расширения спектральной линии пропорциональна угловой скорости вращения планеты относительно наблюдателя. Это вращение складывается из двух движений: собственного вращения планеты в системе координат, помещенной в ее центре и ориентированной на удаленные звезды (эта составляющая имеет постоянную величину и должна быть определена), и переносного движения этой системы относительно наземного наблюдателя. Составляющая вращения, связанная с переносным движением, определяется взаимным положением Земли и Венеры и может быть вычислена независимо. Эта составляющая максимальна в нижнем соединении, когда Венера проходит вблизи Земли.

Результатирующее изменение угловой скорости вращения Венеры относительно наземного наблюдателя, вычисленное для нескольких значений периода вращения в предположении, что ось вращения планеты перпендикулярна плоскости ее орбиты, представлено на рис. 6. Если бы, как и большинство больших планет, Венера имела прямое вращение (совпадающее с ее движением по орбите вокруг Солнца), то результирующее вращение и ширина спектра отраженного сигнала должны были иметь в нижнем соединении максимум, так как обе составляющие вращения одного знака. В случае же обратного вращения знаки составляющих противоположны и результирующее вращение и ширина спектра в нижнем соединении минимальны.

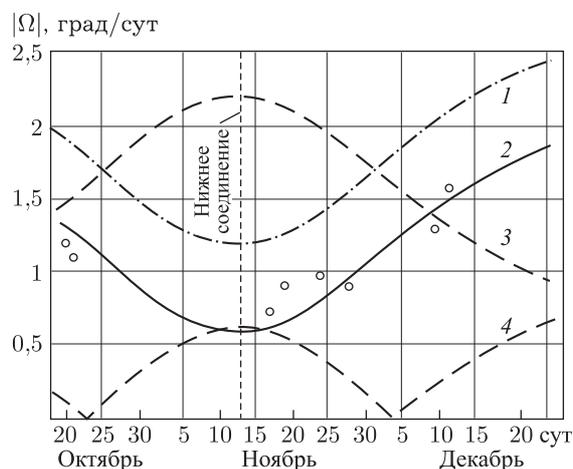


Рис. 6. Определение периода и направления вращения Венеры по наблюдениям вариаций ширины спектра отраженных волн в 1962 г. Кривые представляют изменение угловой скорости видимого вращения Венеры, вычисленное для ряда значений периода $T = 200$ сут. (1); 300 (2); 225 (3); ∞ (4), в предположении, что ось вращения планеты перпендикулярна к ее орбите (1 и 2 соответствуют обратному вращению). Экспериментальные точки лучше всего согласуются с кривой, соответствующей обратному вращению Венеры с $T \sim 300$ сут.

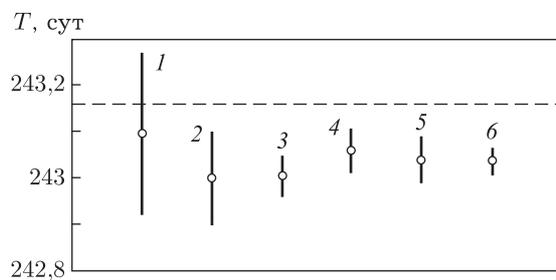


Рис. 7. Период вращения Венеры по радиолокационным наблюдениям, выполненным в США (1–3) и Советском Союзе (4–6). 1: 1964–1966 гг.; 2: 1964–1969 гг.; 3: 1962–1967 гг.; 4: 1964–1972 гг.; 5: 1964–1975 гг.; 6: 1964–1977 гг. Штриховая линия — синодический резонанс, $T = 243,16$ сут.

Уже из наблюдений 1962 г. удалось установить, что спектр отраженного сигнала в нижнем соединении имеет минимальную ширину, что указывает на обратное вращение Венеры, а вариации ширины спектра соответствуют периоду вращения около 300 сут. (см. рис. 6) [17]. В США по наблюдениям 1962 г. период оценен величиной около 250 сут. [47].

Впоследствии параметры вращения Венеры уточнялись по изменению лучевых скоростей локальных областей поверхности планеты,

имеющих на радиоволнах повышенную отражательную способность и наблюдающихся в спектре отраженного сигнала в виде определенных деталей (см. рис. 9). Отождествив области *F*, *G* и *H* (см. рис. 11) в нижних соединениях 1966 и 1964 гг., В. К. Головков получил уточненное значение периода вращения $243,9 \pm 0,4$ сут. и координат вектора вращения: прямое восхождение $88 \pm 4^\circ$, склонение $68 \pm 3^\circ$ [48]. Определения периода вращения Венеры в США дали величину $243,0 \pm 0,1$ сут., прямое восхождение $92,7 \pm 0,7^\circ$, склонение $-65,3 \pm 1,0^\circ$ [49]. Отрицательное значение склонения отражает то, что вектор вращения (с конца которого вращение планеты должно быть видно против движения часовой стрелки) в экваториальной системе координат попадает в южную полусферу.

Таким образом, период вращения Венеры близок к значению 243,16 сут., при котором Венера в каждом нижнем соединении должна быть обращена к Земле одной и той же стороной (синодический резонанс). В промежутке между соединениями, повторяющимися в среднем через 583,92 сут., наземный наблюдатель видел бы четыре полных оборота Венеры, если бы ее поверхность была свободна от облаков. Продолжительность средних солнечных суток на Венере составляет 116,8 земных суток.

Хотя попытки определить период и ориентацию оси из оптических наблюдений предпринимались давно, только радиолокационный метод позволил получить достоверные данные о вращении Венеры. Видимые в ультрафиолетовых лучах образования, движущиеся по диску Венеры со скоростью около 100 м/с, которые пытались использовать для определения вращения, относятся к верхней границе облачного слоя планеты [50], что подтверждено снимками «Маринера-10» и «Венеры-9,-10».

Поскольку вопрос вращения планет представляет большой интерес с точки зрения эволюции Солнечной системы, работа по уточнению периода вращения Венеры была продолжена и результаты ее представлены на рис. 7. Точность измерений растет с увеличением времени наблюдений. Обработка данных, полученных в Советском Союзе и включающих наблюдения 1977 г., дала значение $243,04 \pm 0,03$ сут. [51].

Если вращение Венеры и отличается от синодического резонанса, то это отличие очень мало — период меньше резонансного всего на 2–4 ч. Потребовалось бы около 700 лет, чтобы Венера в нижнем соединении была бы обращена к Земле обратным полушарием.

Исследование поверхности планет

Применение радиолокационных методов (наравне с радиоастрономическими) оказалось очень плодотворным в исследованиях Венеры, поверхность которой закрыта плотным облачным слоем, непрозрачным в видимых, ультрафиолетовых и инфракрасных лучах. В то же время для радиоволн определенной длины атмосфера Венеры оказалась прозрачной, что позволило получить первые сведения о ее поверхности.

Разделение отраженных сигналов по времени запаздывания и доплеровскому смещению частоты позволило исследовать характеристики отражения и получить изображение поверхности Венеры, не прибегая непосредственно к угловому разделению, на котором основаны оптическая астрономия и радиоастрономия. При этом было использовано различие в расстоянии от наземного наблюдателя (антенны локатора) до отдельных участков планеты и различие в лучевых скоростях.

Волновой фронт падающего по лучу зрения 1 излучения (рис. 8) постепенно «освещает» все видимое полушарие планеты, начиная от ближайшей к наземному наблюдателю точки 0 (центра диска планеты). Отраженное излучение запаздывает в соответствии с расстоянием данного участка поверхности от наземного наблюдателя по лучу зрения.

Результаты измерений распределения энергии отраженного излучения по времени запаздывания, полученные в 1962 г. для Венеры на волне 39 см, представлены на рис. 8 [16, 17]. По оси абсцисс нанесено расстояние y отражающих участков по лучу зрения относительно ближайшей точки. Резкий максимум в этой точке говорит о наличии зеркального блика в центре диска планеты, где волны падают почти перпендикулярно поверхности. При наблюдении планет в видимых лучах зеркальное отражение отсутствует.

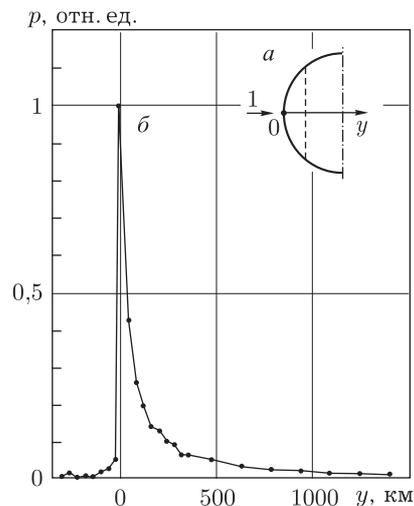


Рис. 8. Распределение энергии отраженных Венерой волн по лучу зрения. Начало координат соответствует ближайшей к наземному наблюдателю точке поверхности планеты (центру диска). Разрешающая способность измерений по лучу зрения 38 км. Резкий максимум в начале координат свидетельствует о наличии зеркального блика в центре диска планеты

Поляризация основной доли энергии отраженных Венерой радиоволн соответствует зеркальному отражению. Деполяризации подвер-

гается меньше 10% всей поступающей обратно к локатору энергии [17]. Поверхность Венеры в среднем имеет коэффициент отражения 12–18% [17]³⁾, как и земные скальные породы на силикатной основе. В результате этих исследований установлено, что отражение радиоволн обусловлено твердой поверхностью Венеры.

Величине коэффициента зеркального отражения при нормальном падении 12–18% соответствует диэлектрическая проницаемость поверхности Венеры около 4–6. Непосредственная интерпретация измерений дифференциальной поляризации собственного излучения Венеры на волне 10,6 см [53] привела к меньшей величине диэлектрической проницаемости $2,2 \pm 0,2$. Однако после введения поправок на поглощение излучения в атмосфере Венеры и шероховатость поверхности это определение удалось согласовать с радиолокационным [54].

В другом методе исследования поверхности планеты используется различие в лучевых скоростях отдельных участков поверхности, вращающейся относительно наземного наблюдателя. Возникающая при этом разница в доплеровском смещении отраженных волн пропорциональна расстоянию x (рис. 9) отражающего участка в экваториальном направлении относительно проекции оси видимого вращения Ω на диск.

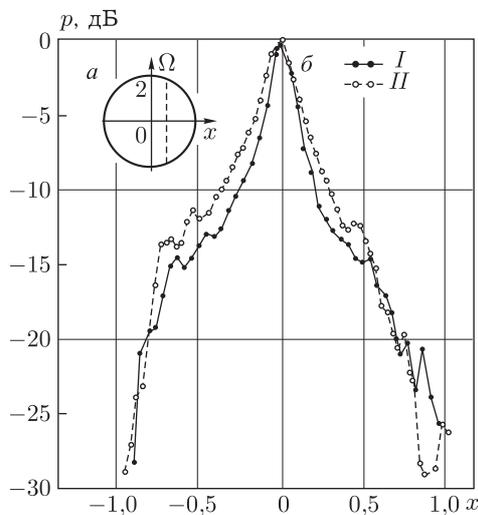


Рис. 9. Распределение энергии отраженного Венерой излучения в экваториальном направлении (нормированный по ширине спектр). I — $\lambda = 39$ см, 28.01.66 г.; II — $\lambda = 3,8$ см, 01.02.66 г. [55]; x выражено в долях радиуса Венеры

³⁾ Для сравнения укажем, что, по нашим наблюдениям, величина коэффициента отражения Меркурия в среднем равна 6% [18] (примерно как у Луны [52]), а Марса несколько ниже: 4–5%.

Результаты измерения спектра отраженного Венерой сигнала, полученные в совместных с английской обсерваторией Джодрел-Бэнк наблюдениях на волне 39 см [21], показаны на рис. 9 (кривая I). На спектрограмме заметны детали, соответствующие областям поверхности Венеры с повышенной отражательной способностью. Эти же детали отождествляются и на второй спектрограмме (кривая II), полученной американскими исследователями на более короткой волне 3,8 см [55] (обе спектрограммы приведены к одной ширине по оси абсцисс). Измерения проведены в близкие даты, когда области занимали на диске планеты примерно одинаковое положение.

Изменение лучевых скоростей, определенное по изменению положения спектральных деталей, приведено на рис. 10. Непрерывным траекториям, объединяющим эти измерения, соответствует положение центров областей с повышенной отражательной способностью, показанное на рис. 11 [48].

Двумерное распределение энергии отраженных волн по времени запаздывания и доплеровскому смещению частоты, характеризующее изменение отражательной способности планеты в направлениях $x(f)$ и $y(\tau)$, полученное в наблюдениях 1970 г., изображено на рис. 12.

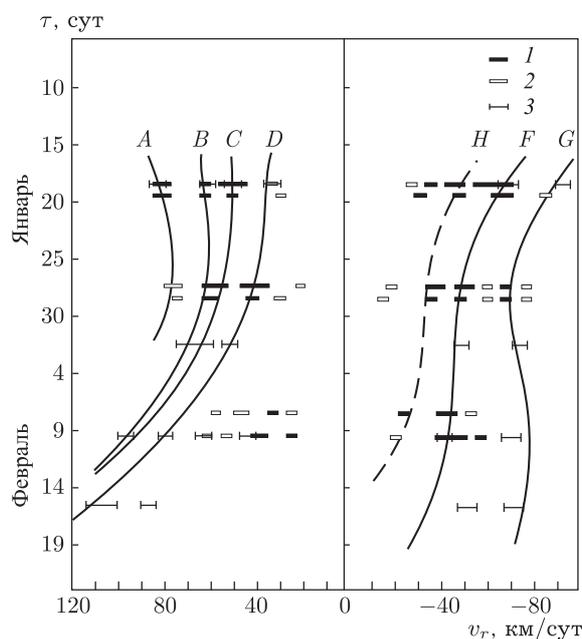


Рис. 10. Лучевые скорости областей поверхности Венеры с повышенной отражательной способностью по наблюдениям 1966 г. 1 — уверенно отождествляемые и 2 — сомнительные спектральные детали по наблюдениям на волне 39 см, 3 — спектральные детали по наблюдениям на волне 3,8 см [55]

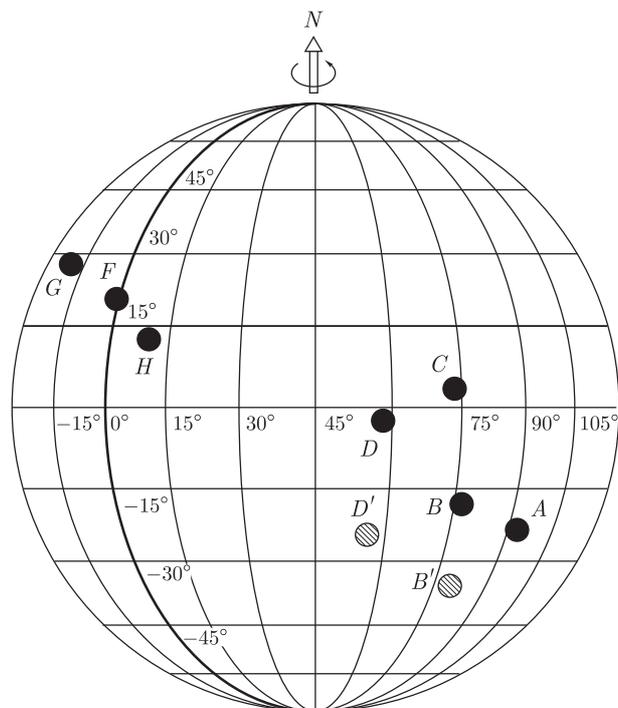


Рис. 11. Расположение центров областей с повышенной отражательной способностью на диске Венеры

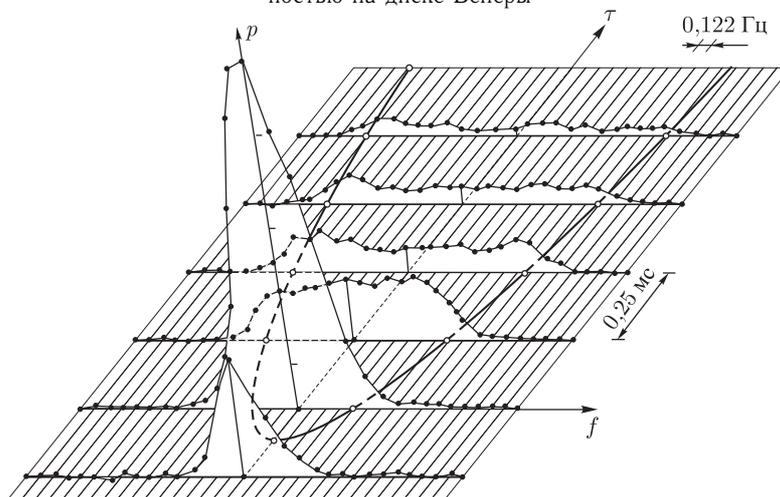


Рис. 12. Двумерное распределение энергии отраженных Венерой волн по лучу зрения и в экваториальном направлении. Стрелками показана разрешающая способность измерений по времени и частоте

Ширина спектра отраженного сигнала непосредственно зависит не только от угловой скорости вращения планеты, но и от степени гладкости ее поверхности. На рис. 13 представлены спектры отраженного сигнала, полученные при радиолокации Венеры (1) [21] и Марса (2) на волне 39 см. По оси абсцисс нанесены доли радиуса планет, проведенного перпендикулярно видимому центральному меридиану (ось x на рис. 9), что исключает разницу во вращении и размерах планет. Меньшая ширина спектра 2 указывает на то, что Марс имеет более гладкую поверхность, чем Венера. Сравнение с результатами исследования Луны [52] показывает, что по степени гладкости поверхность Венеры занимает промежуточное положение между Луной и Марсом.

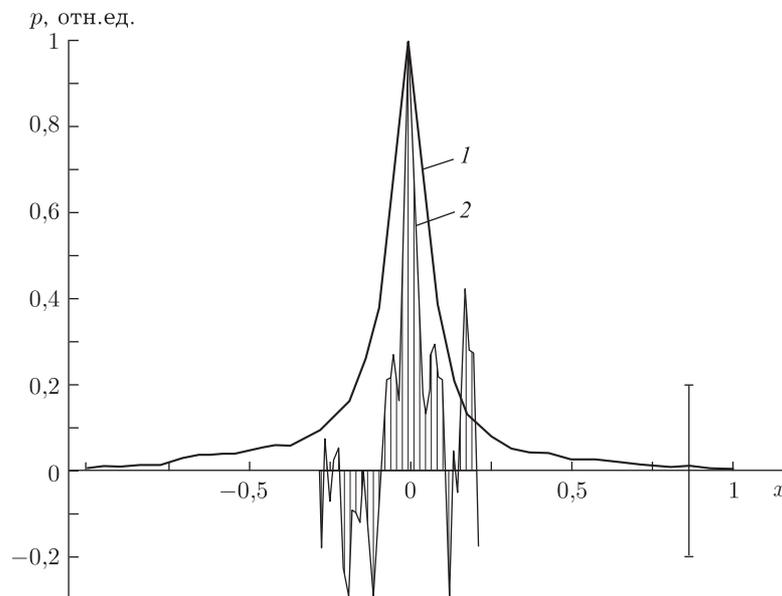


Рис. 13. Распределение энергии отраженного излучения в экваториальном направлении для Венеры (1) и Марса (2) на волне 39 см. Меньшая ширина распределения 2 указывает на большую гладкость поверхности Марса; x выражено в долях радиусов планет

По результатам измерений распределений энергии отраженных волн по времени запаздывания и доплеровскому смещению частоты было найдено, как в среднем изменяется эффективная площадь обратного рассеяния $\sigma(\varphi)$ участка поверхности Венеры единичной геометрической площади в зависимости от угла падения φ [56]. Эта зависимость, представленная на рис. 14, показывает, что при нормальном падении эффективная площадь обратного рассеяния $\sigma(0)$ в 15–20 раз больше геометрической. Но уже при угле падения 7° интенсивность обратного рассеяния падает в 10 раз.

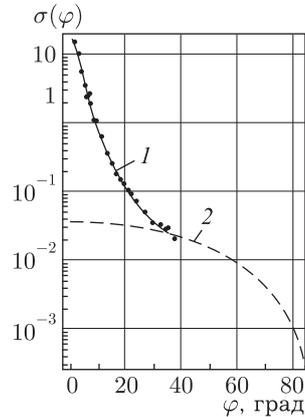


Рис. 14. Удельная эффективная площадь обратного рассеяния поверхности Венеры на волне 39 см для зеркального (1) и диффузного (2) отражений

Характеристики обратного рассеяния для различных областей Венеры изменяются в широких пределах. Измерения удельной эффективной площади обратного рассеяния в экваториальной области Венеры показывают, что $\sigma(0)$ изменяется в пределах от 5 до 35 [57, 58]. Параметр C , введенный Хэгфорсом [59] и характеризующий шероховатость поверхности в масштабах много больше длины волны, изменяется от 170 до 570 [57, 58].

Исследования рельефа поверхности Венеры

Разность между расстоянием, измеренным от антенны радиолокатора до ближайшего участка поверхности планеты (центра диска), и расстоянием до центра масс планеты, положение которого уточняется в процессе измерений, дает расстояние от центра масс планеты той области ее, которая в данный момент проходит через центр диска. По сумме измерений можно найти высоту области над некоторой средней поверхностью.

Высокая точность измерений расстояния, достигнутая при наблюдениях Венеры 1972 г., позволила начать исследования рельефа поверхности планеты. Разработка методики и обработка сигналов с целью получения рельефа поверхности выполнены А. Ф. Хасяновым.

Полученные профили высот поверхности [58] приведены на рис. 15. В нижней части рисунка показаны трассы движения центра диска планеты, вдоль которых измерялся профиль.

Как видно из рис. 15, изрезанность профилей высот различна, перепады высот достигают 2 км. Наибольшую изрезанность имеют профили высот в интервале долгот $280\text{--}293^\circ$ на широте $+5^\circ$. В этой

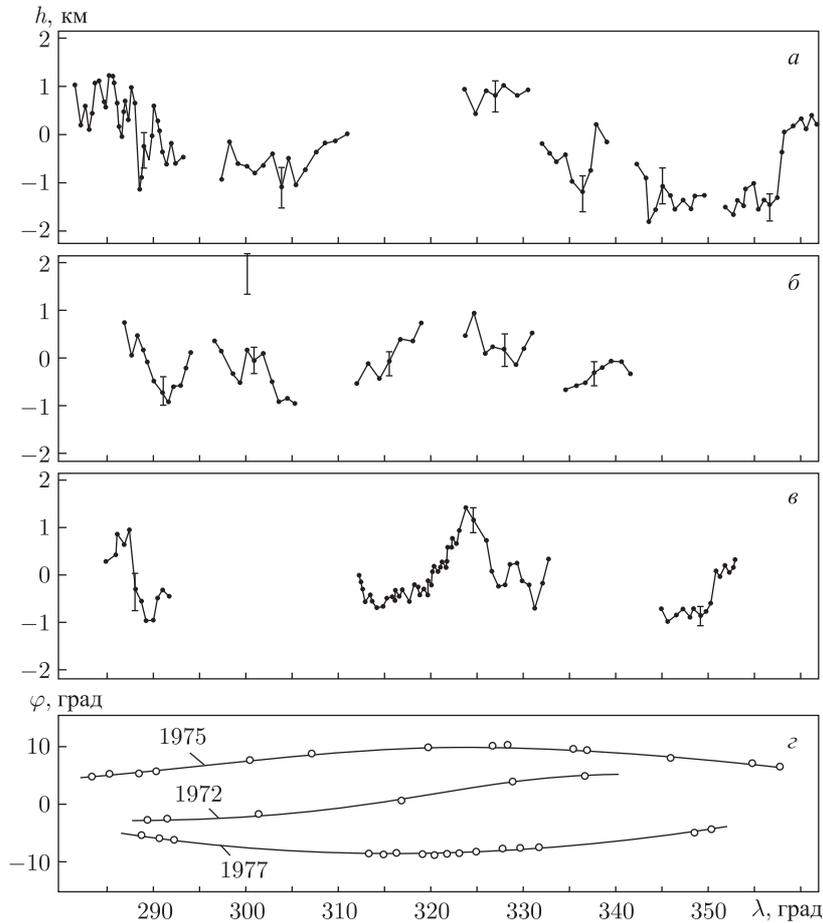


Рис. 15. Профили высот поверхности Венеры. По наблюдениям 1975 (а), 1972 (б) и 1977 гг. (в); г — трассы, вдоль которых производились измерения; φ и λ — широта и долгота в венерографической системе координат

области перепады высот 1–2 км наблюдаются на сравнительно малой базе, что свидетельствует о сложном рельефе поверхности.

Гора вблизи долготы 325° на широте -9° имеет высоту около 2 км при протяженности основания около 1000 км, причем ее левый склон протяженностью около 500 км более гладкий, чем правый.

Интересной является область в интервале долгот 352–360° на широте +6°. Здесь вблизи долготы 357° наблюдается перепад высот на 1,5 км, причем слева и справа от этой долготы находятся равнинные области протяженностью по крайней мере 500–600 км. Исследование характеристик обратного рассеяния этих областей показывает, что

возвышенная область сложена более плотными породами и более шероховата, чем низменная область слева от нее. Возможно, что вблизи долготы 357° происходит переход от «морской области», подобной лунным морям, к горной.

Неожиданным является близкая идентичность профилей высот, полученных в разные годы вблизи долготы 288° , которые разнесены вдоль меридиана более чем на 1000 км. Наблюдается также высокая повторяемость формы правого склона горы вблизи долготы 325° у профилей на широтах -9° и $+9,5^\circ$, отстоящих примерно на 2000 км.

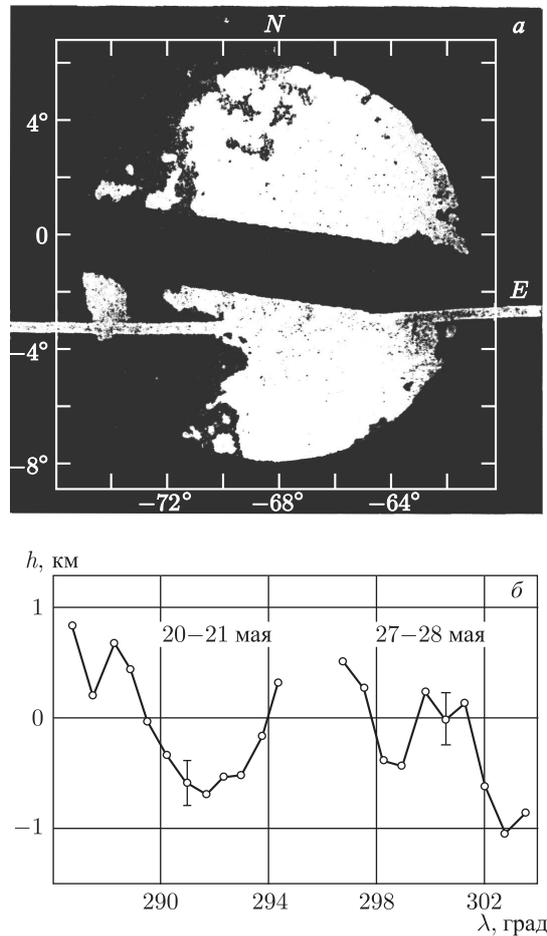


Рис. 16. Сопоставление профиля высот (б), полученного в наблюдениях 1972 г., с картой высот (а), полученной в Голдстоуне [60]. Белой полоской сверху показана трасса измерений 1972 г.

Это наводит на мысль о меридионально расположенных протяженных структурах.

На рис. 16 часть полученного профиля сопоставлена с картой высот той же области, полученной в Голдстоуне (США) [60], на которой темным обозначены низменные районы, а светлым — возвышенные. Белой полоской на карте отмечена трасса наших измерений. Обе группы измерений достаточно хорошо совпадают между собой.

Исследование атмосферы Венеры

Результаты наблюдений собственного радиоизлучения Венеры давали основание предполагать, что заметное поглощение в атмосфере планеты может иметь место только на волнах короче 1,5–2 см [54]. Поэтому неожиданным оказалось уменьшение отражательной способности Венеры в 10–15 раз по сравнению с дециметровым диапазоном, обнаруженное в Линкольновской лаборатории Массачусетского технологического института во время радиолокационных наблюдений на волнах 3,6 и 3,8 см [61, 66]. Хотя уменьшение отражательной способности Венеры происходит очень резко (рис. 17), характеристики отражения остаются примерно такими же, как и на более длинных волнах. Спектральные детали, обусловленные областями поверхности с повышенной отражательной способностью, обнаруженные на дециметровых волнах, наблюдаются также и на волне 8 см (см. рис. 9).

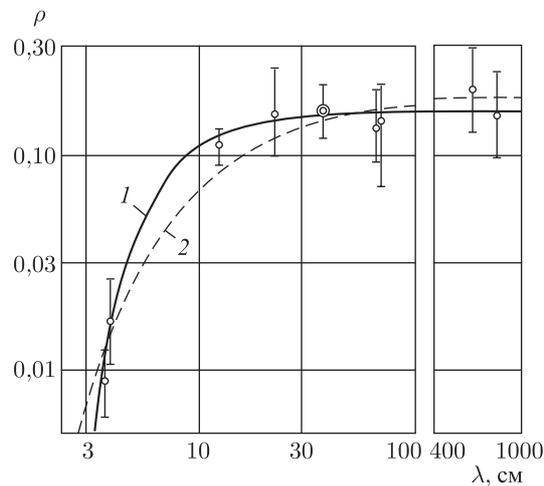


Рис. 17. Спектральные зависимости отражательной способности Венеры. 1 — в случае молекулярного поглощения в газовых составляющих атмосферы; 2 — в случае поглощения в материале, тангенс угла потерь которого не зависит от длины волны

Следовательно, уменьшение отражательной способности вызвано наличием поглощения на пути луча.

Вследствие кривизны поверхности планеты и увеличения длины пути в поглощающем слое при косом падении радиолуча должно иметь место постепенное потемнение диска планеты к лимбу. Такое потемнение в действительности замечено в наблюдениях на волне 3,8 см [55, 21], однако величина поглощения (оптическая толщина), определенная отсюда, получилась в 2 раза меньшей, чем следует из уменьшения отражательной способности [55].

Потемнение диска планеты к лимбу, связанное с увеличением пути луча в поглощающем слое, должно приводить к более сильному ослаблению крыльев спектра отраженного сигнала по сравнению с его центральной частью. Это явление заметно на рис. 9 (хотя центральная часть спектра на волне 3,8 см шире из-за влияния мелкомасштабных неровностей поверхности). Путем непосредственного сравнения крыльев спектра на волнах 3,8 и 39 см (на этой волне влиянием поглощения можно пренебречь) установлено, что оба метода дают практически одинаковый результат [62]. Первоначальное расхождение [55] возникло, по-видимому, из-за недостатка в методике обращения частотного спектра в распределение отражательной способности (яркости) по диску планеты.

Пока не были известны химический состав и глубина атмосферы Венеры, невозможно было установить причину резкого уменьшения ее отражательной способности на сантиметровых волнах. И даже после выдающегося полета межпланетной станции «Венера-4», указавшего, что атмосфера Венеры почти целиком состоит из углекислого газа [63], величина поглощения, следующая из вариации отражательной способности, считалась неправдоподобно большой, чтобы ее можно было целиком отнести на счет поглощения в газовых составляющих атмосферы Венеры. В качестве альтернативной возможности выдвигалось предположение о наличии на поверхности тонкого слоя вещества с малой диэлектрической проницаемостью, который с укорочением волны начинает поглощать излучение, прежде чем оно достигнет более глубоких слоев с большей диэлектрической проницаемостью [64, 65].

Основываясь на разных частотных зависимостях отражательной способности в этих случаях (см. рис. 17), было показано, что с результатами измерений лучше согласуется зависимость, вычисленная в предположении о нерезонансном поглощении радиоволн в газовых составляющих атмосферы Венеры [66]. Именно нерезонансное поглощение излучения в углекислом газе и парах воды, обнаруженное прямыми измерениями межпланетной станции «Венера-4» [63], обуславливает изменение оптической толщины атмосферы Венеры с длиной волны, как показано на рис. 18.

Измерения станции «Венера-4» окончились на некотором уровне над поверхностью планеты, где давление около 20 атм. При отнесении поглощения, определенного по радиолокационным данным, целиком на

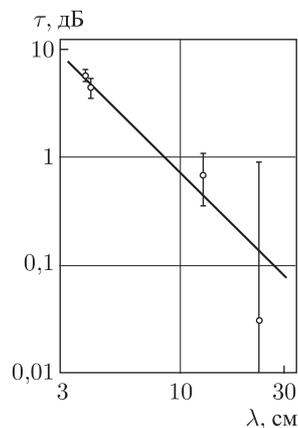


Рис. 18. Оптическая толщина атмосферы Венеры τ при вертикальном прохождении луча

счет углекислого газа и водяного пара и экстраполяции параметров атмосферы, измеренных приборами станции «Венера-4» [67], по адиабате на средней поверхности Венеры получено: давление 110 ± 30 атм, температура 740 ± 35 К [66]. При конструировании спускаемого аппарата станции «Венера-7», рассчитанного на работу при давлении до 180 атм и температуре до 800 К, были учтены, в частности, и эти результаты.

Фактические значения давления и температуры по измерениям межпланетных станций «Венера-7» и «Венера-8» оказались равными 90–95 атм и 740–750 К [68, 69], что подтвердило нашу оценку.

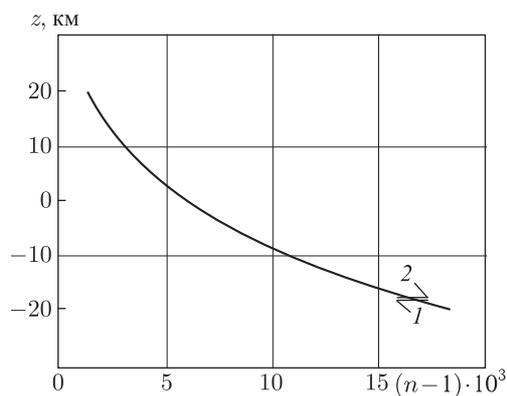


Рис. 19. Изменение коэффициента преломления газа в атмосфере Венеры от высоты над поверхностью. За начало отсчета высоты принят уровень, где давление 26 атм, а температура 596 К. 1 и 2 — положение поверхности по измерениям межпланетных станций «Венера-7» и «Венера-8»

На рис. 19 показано изменение коэффициента преломления атмосферы Венеры с высотой [56]. При его вычислении учитывалось реальное состояние газа и изменение ускорения силы тяжести по высоте. Наличие оптически плотной атмосферы приводит к заметному увеличению времени распространения волн при радиолокации Венеры. В центральной части видимого диска планеты, где волны проходят через атмосферу по вертикали, увеличение времени распространения при радиолокации составляет около 2 мкс [56].

Оценка отражательной способности Юпитера

Первые радиолокационные наблюдения Юпитера предприняты в 1963 г. в СССР на волне 39 см [20] и в США на волне 12,5 см [70]. В наблюдениях на волне 39 см при усреднении за 22 ч оценка энергии отраженного сигнала составила 1–1,5 от среднеквадратичной ошибки, которую мог вызвать флуктуационный шум. В наблюдениях на волне 12,5 см энергия отраженного сигнала усреднялась отдельно по интервалам, в течение которых через центр планетного диска проходили зоны протяженностью 45° по долготе Юпитера. Сигнал был обнаружен лишь в интервалах, соответствующих одной из этих зон, причем оценка энергии превосходила в 8 раз среднеквадратичное значение флуктуационной ошибки.

В 1964 и 1965–1966 гг. наблюдения Юпитера были проведены в Ионосферной обсерватории в Аресибо на волне 70 см [71] при значительно большей чувствительности установки. Эксперимент ставился таким образом, чтобы возможно ближе воспроизвести условия двух предыдущих наблюдений. Отраженный сигнал обнаружить не удалось, хотя чувствительность установки позволяла его обнаружить, если бы отражательная способность Юпитера на волне 70 см была даже в 160–200 раз меньше, чем следовало из наблюдений на волнах 39 и 12,5 см. Наблюдения Юпитера на волне 12,5 см, повторенные в 1964 г., также оказались безрезультатными [72].

Основываясь на отрицательных результатах последних наблюдений, можно предположить, как указывается в [71], о возможных изменениях по сравнению с 1963 г. условий отражения на Юпитере (механизм которого, вообще говоря, неизвестен) или же о наличии в первых наблюдениях незамеченных помех, принятых за отраженный сигнал. В этом случае остается допустить, что радиоволны практически полностью затухают в очень глубокой юпитерианской атмосфере [73].

Заключение

Коллективом сотрудников ИРЭ (совместно с рядом организаций) в Советском Союзе создано и развивается новое направление наблюдательной астрономии — радиолокационное исследование планет.

На базе антенны и передатчика Центра дальней космической связи создана уникальная радиолокационная установка для исследования планет. С помощью этого инструмента начиная с апреля 1961 г. проводятся регулярные наблюдения, в результате которых получен ряд фундаментальных результатов. Кардинально уточнено значение астрономической единицы. Определены период и направление вращения Венеры. Получено распределение отражательной способности по диску Венеры, позволившее установить природу отражающей поверхности Венеры. Впервые получены отраженные сигналы от Меркурия.

Радиолокационные исследования способствовали успешному проведению исследований планет при помощи межпланетных аппаратов. Уточнение астрономической единицы имеет первостепенное значение для космической навигации. С помощью радиолокационной установки Центра дальней космической связи проводятся измерения дальности и радиальной скорости Венеры и Марса с целью прогнозирования положения планет на завершающем этапе полета межпланетных станций. В Советском Союзе накоплен обширный наблюдательный материал и на его основе проведено уточнение элементов орбит Земли и Венеры.

В последнее время на основе радиолокационных наблюдений Венеры, Марса и Меркурия, проведенных в 1962–1980 гг., в Советском Союзе создана единая релятивистская теория движения внутренних планет [74, 75], обеспечивающая вычисление взаимных положений планет с точностью 5–15 км, что в 10–100 раз превышает точность классических теорий.

Результаты исследования характеристик отражения поверхности Венеры и Марса, оценка параметров атмосферы у поверхности Венеры, данные о поглощении радиоволн в атмосфере Венеры были использованы при создании спускаемых аппаратов межпланетных станций серии «Венера» и «Марс».

Авторы выражают глубокую благодарность сотрудникам организаций, принимавшим участие в создании радиолокатора и проведении наблюдений, в особенности сотрудникам Центра дальней космической связи.

Литература

1. Price R., Green P. E., Goblík T. J., Kingston R. H., Kraft L. G., Pettengill G. H., Silver R., Smith W. B. — Science, 1959, 129, p. 751.
2. Evans J. V., Taylor G. N. — Nature, 1959, 181, p. 1358.
3. Котельников В. А., Апраксин Л. В., Войтов В. О., Голубцов М. Г., Дубровин В. М., Зайцев Н. М., Коренберг Е. Б., Минашин В. Н., Морозов В. А., Никитский Н. И., Петров Г. М., Ржига О. Н., Шаховской А. М. — Радиотехника и электроника, 1962, 7, с. 1851.
4. Морозов В. А., Трунова З. Г. — Радиотехника и электроника, 1962, 7, с. 1880.

5. Бунимович В. И., Морозов В. А. — Радиотехника и электроника, 1962, 7, с. 1873.
6. Kotelnikov V. A., Radar Contact with Venus: Paper presented to XII Intern. Astronautical Congress. New York, 1961.
7. Котельников В. А., Дубровин В. М., Морозов В. А., Петров Г. М., Ржига О. Н., Трунова З. Г., Шаховской А. М. — Радиотехника и электроника, 1962, 7, с. 1860.
8. Котельников В. А., Кузнецов Б. И., Лишин И. В. Устройство для получения сигналов с частотной модуляцией по ступенчато-пилообразному закону: А. с. 163215 (СССР). — Бюл. изобрет., 1964, № 12, с. 32.
9. Жаботинский М. Е., Францессон А. В. — Радиотехника и электроника, 1964, 9, с. 114.
10. Александров Ю. Н., Кузнецов Б. И., Петров Г. М., Ржига О. Н. — Астрон. журн., 1972, 49, с. 175.
11. Александров Ю. Н., Зятцкий В. А., Ржига О. Н. — Астрон. журн., 1967, 44, с. 1060.
12. Александров Ю. Н. — Информ. бюл. Совета по автоматизации научных исследований, 1970, № 2, с. 19.
13. Александров Ю. Н. Развитие цифровых методов спектральных измерений отраженных сигналов при радиолокации планет: Канд. дис. М.: ИРЭ АН СССР, 1972.
14. Петров Г. М., Барабошкин С. М., Зайцев А. Л. Устройство для синтеза сигнала с линейным изменением частоты: А. с. 599328 (СССР). — Бюл. ОИПОТЗ, 1978, № 11, с. 177.
15. Петров Г. М., Барабошкин С. М., Зайцев А. Л. Устройство для синтеза сигнала с изменением частоты по закону полинома n -й степени: А. с. 596954 (СССР). — Бюл. ОИПОТЗ, 1978, № 9, с. 197.
16. Котельников В. А., Дубровин В. М., Дубинский Б. А., Кислик М. Д., Кузнецов Б. И., Лишин И. В., Морозов В. А., Петров Г. М., Ржига О. Н., Сыцко Г. А., Шаховской А. М. — ДАН СССР, 1963, 151, с. 532.
17. Rzhiga O. N. Radar Observations of Venus in the Soviet Union in 1962: Paper presented to IV Intern. Sympos. COSPAR, Warsaw, 1963. Amsterdam: North-Holland Co., 1964, p. 178.
18. Котельников В. А., Гуськов Г. Я., Дубровин В. М., Дубинский Б. А., Кислик М. Д., Коренберг Е. Б., Минашин В. П., Морозов В. А., Никитский Н. И., Петров Г. М., Подпригора Г. А., Ржига О. Н., Францессон А. В., Шаховской А. М. — ДАН СССР, 1962, 147, с. 1320.
19. Котельников В. А., Дубровин В. М., Дубинский Б. А., Кислик М. Д., Кузнецов Б. И., Петров Г. М., Работягов А. П., Ржига О. Н., Шаховской А. М. — ДАН СССР, 1963, 151, с. 811.
20. Котельников В. А., Апраксин Л. В., Дубровин В. М., Кислик М. Д., Кузнецов Б. И., Петров Г. М., Ржига О. Н., Францессон А. В., Шаховской А. М. — ДАН СССР, 1964, 155, с. 1037.

21. Kotelnikov V. A., Alexandrov Yu. N., Golovkov V. K., Petrov G. M., Rzhiga O. N. The Joint Soviet-English Radar Observations of Venus: Paper presented to XIII General Assembly IAU. Prague, 1967, Aug.
22. Котельников В. А., Аким Э. Л., Александров Ю. Н., Гераскин В. Т., Головков В. К., Дубровин В. М., Зайцев А. Л., Каевицер В. И., Кузнецов Б. И., Наумкин Ю. К., Петров Г. М., Ржига О. Н., Францессон А. В., Хасянов А. Ф., Шаховской А. М. — *Астрон. журн.*, 1973, 50, с. 836.
23. Котельников В. А., Аким Э. Л., Александров Ю. Н., Головков В. К., Дубровин В. М., Зайцев А. Л., Каевицер В. И., Крымов А. А., Кузнецов Б. И., Наумкин Ю. К., Петров Г. М., Подоляннюк В. М., Ржига О. Н., Хасянов А. Ф., Шаховской А. М. — *Астрон. журн.*, 1976, 53, с. 1270.
24. Котельников В. А., Александров Ю. Н., Головков В. К., Дубровин В. М., Зайцев А. Л., Каевицер В. И., Крымов А. А., Наумкин Ю. К., Петров Г. М., Ржига О. Н., Хасянов А. Ф., Шаховской А. М. — *Астрон. журн.*, 1979, 56, с. 705.
25. Александров Ю. Н., Ржига О. Н., Шаховской А. М. — *Космич. исследования*, 1971, 9, с. 904.
26. Куликов К. А. *Фундаментальные постоянные астрономии*. М.: Гостехиздат, 1956.
27. Котельников В. А., Дубинский Б. А., Кислик М. Д., Цветков Д. М. — *Искусственные спутники Земли*, 1963, № 17, с. 101.
28. Thomson J. H., Ponsonby J. E. V., Taylor G. N., Rogers R. S. — *Nature*, 1961, 190, p. 519.
29. Pettengill G. H., Briscole H. W., Evans J. V., Gehrels E., Hyde G. M., Kraft L. G., Price R., Smith W. B. — *Astron. J.*, 1962, 67, p. 181.
30. Muhleman D. O., Holdridge D. B., Block N. — *Astron. J.*, 1962, 67, p. 191.
31. Ponsonby J. E. V., Thomson J. H., Imre K. S. — *Month. Notices Roy. Astron. Soc.*, 1964, 128, p. 1.
32. Klempere W. K., Ochs G. R., Bowles K. L. — *Astron. J.*, 1964, 69, p. 22.
33. Shapiro I. I. — In: *Radar Astronomy*. New York: McGraw-Hill Book Co., 1968, p. 143.
34. Rabe E. — *Astron. J.*, 1950, 55, p. 112.
35. McGuire J. B., Spangler E. R., Wong L. — *Sci. Amer.*, 1961, 204, p. 464.
36. Rabe E. — *Astron. J.*, 1967, 72, p. 852.
37. Knowles S. H. — *Astron. J.*, 1969, 74, p. 291.
38. *Фундаментальные постоянные астрономии/ Под ред. В. В. Подобеда*. М.: Мир, 1967.
39. Петров Г. М. *Определение астрономической единицы по радиолокационным наблюдениям планет, проводившимся в Советском Союзе в 1961, 1962 и 1964 годах*: Канд. дис. М.: ИРЭ АН СССР, 1968.
40. Baird R. C., — *Proc. IEEE*, 1967, 55, p. 1032.
41. *Sky and Telescope*, 1972, 44, p. 353.
42. Аким Э. Л., Степаньянц В. А. — *ДАН СССР*, 1977, 233, с. 314.

43. Кислик М. Д., Колюка Ю. Ф., Котельников В. А., Петров Г. М., Тихонов В. Ф. — ДАН СССР, 1978, 241, с. 1046.
44. Ash M. E., Shapiro I. I., Smith W. B. — *Astron. J.*, 1967, 72, p. 338.
45. Vaucouler G. — *Icarus*, 1964, 3, p. 187.
46. Smith W. B., Ingalls R. P., Shapiro I. I., Ash M. E. — *Radio Sci.*, 1970, 5, p. 411.
47. Goldstein R. M., Carpenter R. L. — *Science*, 1963, 139, p. 910.
48. Головков В. К. — В кн.: *Физика Луны и планет*. М.: Наука, 1972, с. 314.
49. Yurgens R. F. — *Radio Sci.*, 1970, 5, p. 435.
50. Boyer C., Newell R. E. — *Astron. J.*, 1967, 72, p. 679.
51. Александров Ю. Н., Головков В. К., Дубровин В. М., Зайцев А. Л., Каевичер В. И., Крымов А. А., Петров Г. М., Хасянов В. Ф., Шаховской А. М. — В кн.: *X Всесоюз. конф. по радиоастрономическим исследованиям Солнечной системы: Тезисы докл.* Иркутск: Сиб. ИЗМИР СО АН СССР, 1977, с. 66.
52. Evans J. V. — *J. Res. NBS*, 1965, 69D, p. 1637.
53. Кузьмин А. Д., Кларк Б. Дж. — *Астрон. журн.*, 1965, 42, с. 595.
54. Кузьмин А. Д. *Радиофизические исследования Венеры*. М.: ВИНТИ, 1967.
55. Evans J. V., Ingalls R. P., Rainville L. P., Silva R. P. — *Astron. J.*, 1966, 71, p. 902.
56. Ржига О. Н. *Развитие методики и некоторые результаты исследования физической природы планет при помощи радиолокации: Докт. дис.* М.: ИРЭ АН СССР, 1971.
57. Головков В. К., Кузнецов Б. И., Петров Г. М., Хасянов А. Ф. — *Астрон. журн.*, 1970, 53, с. 411.
58. Александров Ю. Н., Головков В. К., Дубровин В. М., Зайцев А. Л., Каевичер В. И., Крымов А. А., Петров Г. М., Хасянов А. Ф., Шаховской А. М. — В кн.: *X Всесоюз. конф. по радиоастрономическим исследованиям Солнечной системы: Тезисы докл.* Иркутск: Сиб. ИЗМИР СО АН СССР, 1977, с. 67.
59. Hagfors T. — *J. Geophys. Res.*, 1964, 69, p. 3779.
60. Goldstein R. M., Green R. R., Rumsey H. C. — *J. Geophys. Res.*, 1976, 81, p. 4807.
61. Carr D., Morgow W. E., Smith W. B. — *Icarus*, 1964, 3, p. 473.
62. Александров Ю. Н. — В кн.: *Физика Луны и планет*. М.: Наука, 1972, с. 309.
63. Виноградов А. Н., Сурков Ю. А., Флоренский К. П., Андрейчиков Б. М. — ДАН СССР, 1968, 179, с. 37.
64. Pollack J. V., Sagan C. *Icarus* — 1965, 4, p. 62.
65. Стрелков Г. М. — *Астрон. вестн.*, 1968, 2, с. 19.
66. Ржига О. Н. — В кн.: *Физика Луны и планет*. М.: Наука, 1972, с. 367.

67. Авдуевский В. С., Маров М. Я., Рождественский М. К. — Космич. исследования, 1969, 7, с. 233.
68. Маров М. Я., Авдуевский В. С., Рождественский М. К., Бородин Н. Ф., Кержанович В. В. — Космич. исследования, 1971, 9, с. 570.
69. Маров М. Я., Авдуевский В. С., Кержанович В. В., Рождественский М. К., Бородин Н. Ф., Рябов О. Л. — ДАН СССР, 1973, 210, с. 559.
70. Goldstein R. M. — Science, 1964, 144, p. 842.
71. Dyce R. V., Pettengill G. H., Sanchez A. D. — Astron. J., 1967, 72, p. 771.
72. Goldstein R. M. — J. Res. NBS, 1965, 69D, p. 1629.
73. Мороз В. И. Физика планет. М.: Наука, 1967.
74. Александров Ю. Н., Вышло А. С., Дубровин В. М., Зайцев А. Л., Игнатов С. П., Каевицер В. И., Котельников В. А., Крымов А. А., Петров Г. М., Ржига О. Н., Тагаевский А. Т., Хасянов А. Ф., Шаховской А. М. — ДАН СССР, 1980, 255, № 6.
75. Кислик М. Д., Колюка Ю. Ф., Котельников В. А., Петров Г. М., Тихонов В. Ф. — ДАН СССР, 1980, 255, № 3.