

## УСПЕХИ ПЛАНЕТНОЙ РАДИОЛОКАЦИИ

*В. А. Котельников, В. М. Дубровин, Б. И. Кузнецов, Г. М. Петров,  
О. Н. Ржига, А. М. Шаховской*

Природа. Ежемесячный популярный естественно-научный журнал Академии наук СССР. 1964, № 9

*За радиолокационные исследования планет Венера, Меркурий и Марс Ленинская премия 1964 года была присуждена академику В. А. Котельникову, доктору технических наук М. Д. Кислику, научным сотрудникам В. М. Дубровину, В. А. Морозову, Г. М. Петрову, О. Н. Ржиге, А. М. Шаховскому и В. П. Минашину*

Планетная радиолокация в принципе аналогична обычной радиолокации, с которой мы имеем дело на Земле. Сущность ее заключается в том, что при помощи мощного передатчика и остронаправленной антенны с Земли к планете посылаются радиоволны, которые отражаются и возвращаются обратно. Принимая эти радиоволны достаточно чувствительным приемником, можно получить данные о движении планеты и о строении ее поверхности.

Первым внеземным телом, от которого получили радиозэхо, был наш спутник — Луна, расстояние до которой составляет в среднем 380 000 км. Еще в 20-х гг. в связи с первыми опытами импульсного зондирования ионосферы обсуждалась возможность обнаружения отраженных от Луны радиосигналов. Однако прошло два десятилетия, прежде чем развитие радиотехники позволило осуществить этот эксперимент. Первые радиолокационные отражения от Луны были получены в 1946 г. де Виттом, Стодола и др. в США и почти одновременно Баем в Венгрии на переоборудованных военных радиолокационных станциях. Эти опыты положили начало новому, активному методу исследования небесных тел.

В последующие годы благодаря совершенствованию радиолокационной аппаратуры стало возможным проводить детальные исследования отражающих свойств лунной поверхности на радиоволнах. Многочисленные измерения, произведенные в диапазоне волн от 8 мм до 8 м (Эванс и Петенгил, 1963 г.)<sup>1)</sup>, показали, что поверхность Луны более гладкая, чем предполагали ранее. Основное отражение радиоволн про-

---

<sup>1)</sup> Здесь и дальше в скобках указываются авторы статей и год опубликования.

исходит от ближайшей к Земле части лунной поверхности — шарового сегмента глубиной в несколько километров. Это позволило измерять расстояние до Луны с ошибкой меньше 1 км, что на порядок величины превышает среднюю точность астрономических наблюдений. Оказалось, что от поверхности Луны в направлении к локатору отражается примерно 7% от той энергии, которая отразилась бы, если бы она была гладкой, идеально проводящей сферой. В последнее время в США проводились эксперименты, в результате которых были получены первые карты отражения радиоволн отдельными участками Луны (Грин и Петенгил, 1960 г.).

Опыт, накопленный при радиолокации Луны, был использован при подготовке к радиолокации Венеры. Хотя Венера подходит к Земле ближе других планет, знаем мы о ней немного: сплошной облачный покров, закрывающий планету, не позволяет астрономам разглядеть, что находится на ее поверхности. Для радиоволн облака не представляют непреодолимой преграды, поэтому можно получить отражения от самой поверхности планеты.

Эта задача была несравненно более трудной из-за большого расстояния. Так, при сохранении той же антенны и того же приемника, которые использовались при локации Луны, потребовалось бы значительно увеличить мощность передатчика. Известно, что при радиолокации мощность принимаемых сигналов падает пропорционально четвертой степени расстояния, в отличие от радиосвязи, где мощность сигналов убывает пропорционально квадрату.

Первые опыты по радиолокации Венеры (закончившиеся, как первоначально полагали, удачно) были проделаны в 1958 г. в США (Прайс, Грин и др., 1959 г.)<sup>2)</sup> и повторены в 1959 г. в Англии (Эванс и Тейлор, 1959 г.). Но как теперь выяснилось, результаты этих опытов оказались ошибочными, так как за отраженный сигнал были приняты случайные выбросы шумов приемника. Успешная радиолокация Венеры впервые была проведена в 1961 г. во время нижнего соединения (наименьшее расстояние между Землей и Венерой — около 40 млн км) при помощи созданных к этому времени более мощных и совершенных радиолокаторов. Это было сделано одновременно в США (Массачусетский технологический институт и Калифорнийский технологический институт), в Англии (Радиообсерватория Джодрелл-Бэнк) и в Советском Союзе (Институт радиотехники и электроники АН СССР совместно с другими организациями). Во время нижнего соединения в 1962 г. в этих странах снова были проведены радиолокационные наблюдения Венеры.

Усовершенствование аппаратуры позволило вслед за тем получить радиолокационные отражения от Меркурия и Марса. Меркурий — самая маленькая из основных планет солнечной системы. Его диаметр

---

<sup>2)</sup> См. «Природа», 1960, № 2, стр. 80.

в 2,5 раза меньше, чем у Венеры, расстояние от Земли до него не бывает меньше 80 млн км. Он обращается в непосредственной близости от Солнца, что очень затрудняет визуальные наблюдения. Поэтому о Меркурии, как и о Венере, известно сравнительно мало. Радиолокация Меркурия была произведена сначала в СССР в июне 1962 г., а затем повторена почти через год в США. Оказалось, что Меркурий отражает радиоволны примерно так же, как и Луна.

В феврале 1963 г., во время противостояния Марса, одновременно в Советском Союзе и США были получены радиолокационные отражения и от этой планеты, находящейся на расстоянии 100 млн км.

В сентябре-октябре того же года, благодаря дальнейшему повышению чувствительности радиолокатора, в Советском Союзе удалось получить отражения от Юпитера — самой большой планеты солнечной системы. Во время этого эксперимента радиоволнам приходилось проходить путь в 1 млрд 200 млн км. Вернувшийся от планеты сигнал был очень ослаблен, и чтобы обнаружить его, пришлось накапливать энергию в течение двадцати с лишним часов. Коэффициент отражения Юпитера оказался больше 10%.

В табл. 1 дано время, необходимое радиоволнам, чтобы пройти расстояние до планеты и вернуться обратно.

Таблица 1.

Планета	Время локации (СССР)	Мощность сигнала на всю планету (в ваттах)	Расстояние (в млн км)	Время распространения сигналов (в мин.)
Венера	апрель 1961 г.	15	43–43	5
	октябрь-декабрь 1962 г.	23–9	40–65	4,5–7
Меркурий	июнь 1962 г.	1	83–88	9–10
Марс	февраль 1963 г.	1,2	100–101	11
Юпитер	сентябрь-октябрь 1963 г.	13	592–600	66–67

В октябре-ноябре 1963 г. радиолокация Юпитера была проведена и в США.

### Радиолокационные измерения расстояния до планет

Разработанные астрономами и столетиями совершенствовавшиеся методы измерения расстояний до небесных тел требовали проведения большого числа очень точных угломерных измерений положения планет из разных пунктов Земли. Эти исследования надо было проводить совместно в нескольких обсерваториях, расположенных часто

на разных континентах. Для наблюдений требовались благоприятные атмосферные условия.

Академики Л. И. Мандельштам и Н. Д. Папалекси, много занимавшиеся разработкой радиодальномерных систем, еще за несколько лет до осуществления радиолокации Луны показали, что при помощи известных в то время радиометодов расстояние до нее можно измерить точнее и проще, чем позволяют оптические методы.

Ультракороткие радиоволны, которые свободно проходят через ионосферу, как известно, распространяются от Земли к планете и затем обратно к Земле по кратчайшему пути со скоростью, равной скорости света. Измеряя время пробега радиоволн, можно определить расстояние до планеты и отдельных элементов ее поверхности. Точность измерения расстояния при этом может быть достигнута очень высокая, так как величина скорости света сейчас известна с точностью до одной миллионной. Время может быть измерено с точностью большей, чем одна стомиллионная от длительности измеряемого интервала.

Существует ряд способов измерения расстояния при помощи радиоволн. Остановимся на одном из них — способе линейной частотной модуляции, примененной нами в 1962 г. при радиолокации Венеры. Частота излучаемых колебаний при этом периодически изменялась по пилообразному закону.

Изменение частоты отраженных сигналов в приемнике (рис. 1) происходило по такому же закону, но с запаздыванием, равным времени распространения сигнала до планеты и обратно.

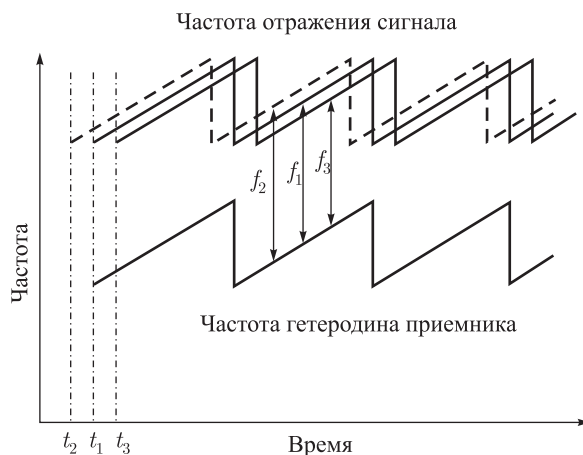


Рис. 1. Изменение частоты на выходе приемника в зависимости от момента прихода отраженного сигнала при измерении расстояния методом частотной модуляции

Частота колебаний на выходе приемника была равна разности частот отраженного сигнала и местного гетеродина. Во время приема частота гетеродина изменялась по пилообразному закону так же, как частота передатчика при передаче (см. рис. 1), но с задержкой на время распространения сигнала до планеты и обратно. Для этого модуляция частоты гетеродина начиналась в момент  $t_1$ , когда по расчету отраженный сигнал должен был вернуться.

Разность частот сигнала и гетеродина зависела от измеряемого расстояния. Так, если принятое в расчетах значение было равно фактическому расстоянию, то начало модуляции гетеродина на приеме точно соответствовало фактическому времени прихода отраженного сигнала  $t_1$  (этот случай показан на рисунке жирной линией) и частота на выходе приемника была номинальной —  $f_1$ . Если расстояние было меньше принятого в расчетах, то отраженный сигнал приходил раньше — в момент  $t_2$  (пунктирная линия) и частота на выходе приемника становилась выше номинальной —  $f_2$ . Если же расстояние было больше расчетного, то отраженный сигнал приходил позже — в момент  $t_3$  (тонкая сплошная линия) и частота на выходе приемника получалась ниже номинальной —  $f_3$ . По отклонению частоты на выходе приемника от номинального значения можно было найти поправку к тому расстоянию, которое было принято в расчетах.

Радиолокационные измерения расстояния до планет дают очень надежный способ определения астрономической единицы — основного масштаба длины в солнечной системе.

### Определение астрономической единицы

Все расстояния в межпланетном пространстве вычисляются астрономами очень точно через среднее расстояние между Землей и Солнцем<sup>3)</sup>. Этой величине длины было присвоено название астрономической единицы. Определяя расстояние до планеты в астрономических единицах, а затем измерив его при помощи радиолокатора в километрах, можно выяснить какова же в действительности величина астрономической единицы.

Ранее она неоднократно определялась различными астрономическими методами. Результаты этих измерений астрономической единицы и радиолокационные данные 1961 г. представлены на рис. 2. Затухающие прямоугольники изображают ошибки, как определили их сами авторы.

Из рисунка 2 видно, что астрономические методы дают значения астрономической единицы, лежащие в пределах от 149,4 до 149,7 млн км.

<sup>3)</sup> См. «Природа», 1961, № 9, стр. 24–31.

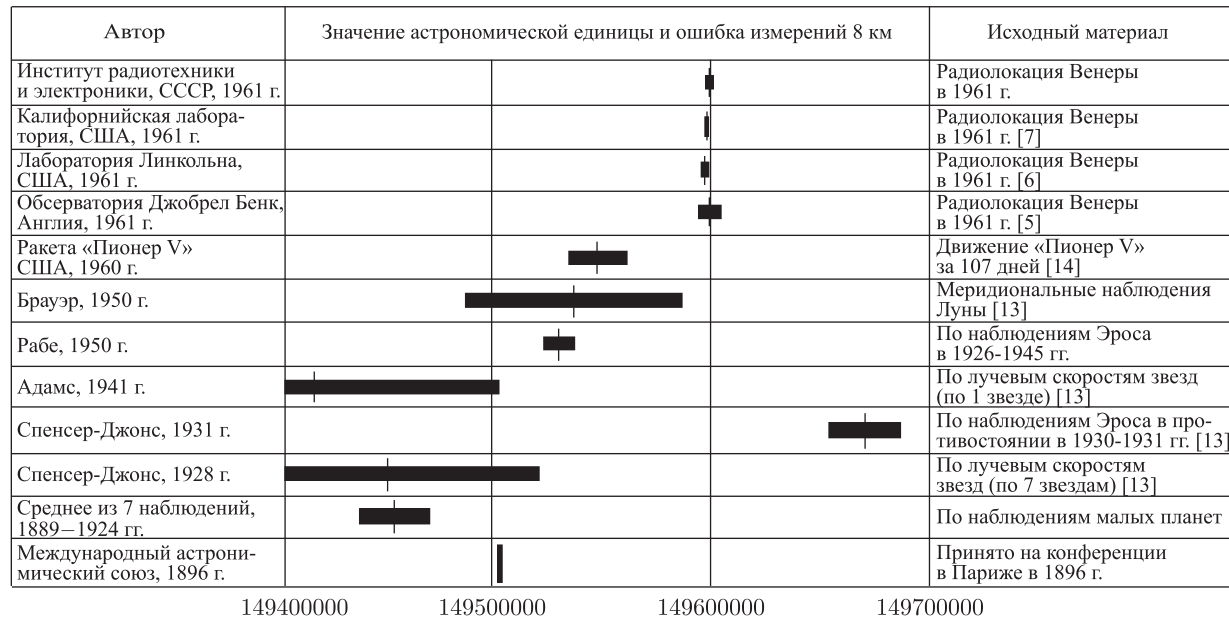









Рис. 2. Результаты определения астрономической единицы радиолокационными и астрономическими методами

Радиолокационные измерения 1961 г. дали, как видно из рисунка, совпадающие и намного более точные результаты, чем полученные астрономами. Надежность этих результатов не вызывает никаких сомнений, так как измерения были проведены независимо в трех странах на разных длинах волн и расхождения получились в пределах ожидаемых ошибок. Измерения повторялись много раз: чувствительность аппаратуры была достаточно велика, чтобы уверенно регистрировать отраженный от Венеры сигнал.

Результаты измерения астрономической единицы по радиолокационным наблюдениям Венеры в 1961 и 1962 гг. представлены на рис. 3 в увеличенном масштабе. Значение астрономической единицы по этим измерениям лежит в пределах от 149 596 600 до 149 600 000 км.

Автор	Частота в МГц	Значение астрономической единицы и ошибка измерений 8 км	
Институт радиотехники и электроники, СССР, 1962	700		149 598 100 ± 750
Калифорнийский институт, США, 1962	2388		149 598 900 ± 670
Обсерватория Джодрелл-Бэнк, Англия, 1962	410,25		149 596 600 ± 900
Институт радиотехники и электроники, СССР, 1961	700		149 599 300 ± 2000
Калифорнийский институт, США, 1961	2388		149 598 640 ± 200
Массачусетский институт, США, 1961	440		149 598 000 ± 300
Обсерватория Джодрелл-Бэнк, Англия, 1961	408		149 600 000 ± 5000

149 595 000                      149 600 000

Рис. 3. Результаты определения астрономической единицы по радиолокационным наблюдениям Венеры в 1961 и 1962 гг. Скорость света в этих наблюдениях принималась равной 299 792,5 км/сек, радиус Венеры — 6100 км. Для измерений, произведенных в СССР, дано максимальное значение ошибки, в котором учтены погрешности за счет аппаратуры, неточного знания скорости распространения радиоволн, радиуса Венеры и неточности эфемерид. В измерениях, проведенных в других странах, эти ошибки учтены не полностью

На этом же рисунке указаны частоты передатчиков радиолокаторов; крайние значения их (408 ÷ 2388 МГц) отличаются почти в 6 раз. Если бы наличие заряженных частиц в межпланетном пространстве оказывало существенное влияние на распространение радиоволн этого диапазона, то измеренное расстояние (и значение астрономической единицы) на более коротких волнах получилось бы меньше, чем на более длинных, которые сильнее подвержены влиянию ионизированной среды. Отсутствие видимой связи между полученными значениями астрономической единицы и частотой, на которой проводились измерения, свидетельствует о том, что влияние межпланетной среды находится в пределах ошибок измерений.

Данные рис. 3 были получены из наблюдений движения одной планеты. Радиолокация Меркурия и Марса в 1962—1963 гг. позволила произвести независимые измерения астрономической единицы еще по двум планетам. Эти измерения дали результаты, сходные с радиолокационными наблюдениями Венеры.

До проведения радиолокационных измерений наиболее достоверным считалось значение  $149\,532\,000 \pm 7000$  км, полученное Рабе в 1950 г. по наблюдениям малой планеты Эрос (см. рис. 2). Ошибка определения Рабе, как показали радиолокационные измерения, составляла  $64 \div 68$  тыс. км, т. е. 0,04 % астрономической единицы. Сравнительно высокая точность этого определения вполне соответствует требованиям астрономических наблюдений, но была совершенно недостаточной для вождения межпланетных космических кораблей. Например, при запуске с Земли к Марсу космического корабля такая ошибка привела бы к тому, что корабль прошел бы в стороне от Марса примерно на расстоянии в 15 радиусов этой планеты.

На основании наиболее точных радиолокационных измерений (см. рис. 3) значение астрономической единицы теперь известно примерно в 100 раз точнее результатов Рабе, что имеет исключительное значение для космических полетов. Дальнейшее уточнение астрономической единицы ограничивается не возможностями радиолокационной аппаратуры, а неточным знанием параметров орбиты Венеры, ее радиуса и значения скорости света.

### Уточнение параметров орбиты и размеров Венеры

Точное измерение расстояния до планеты на протяжении длительного интервала времени позволяет наряду с астрономической единицей уточнить также параметры орбиты (эксцентриситет, положение на орбите и т. д.). Так, например, если размеры орбиты известны точно, но планета находится на орбите впереди вычисленного положения, то измеренное расстояние до соединения, когда планета движется к Земле, будет меньше вычисленной величины, а после соединения, когда планета удаляется, — больше вычисленной величины. Это смещение можно найти и внести в таблицы, по которым рассчитывается движение планеты.

Возможность такого уточнения можно показать на результатах наших измерений расстояния до Венеры в октябре-декабре 1962 г. (рис. 4). Кружками здесь показано изменение в зависимости от даты наблюдения  $\Delta r$ , которая представляет собой разность между измеренным расстоянием до Венеры и вычисленным по имевшимся ранее сведениям об орбите планеты. Астрономическая единица принималась при этом равной  $149\,599\,300$  км. Измеряемое расстояние менялось от 40 млн км (минимальное — 13 ноября, во время нижнего соединения Венеры) до 65 млн км (21 декабря). На этом рисунке около кружков также показана результирующая погрешность измерений за данный



день, составлявшая 7–15 км. (Заметим, что в наших измерениях 1961 г. эта ошибка составляла несколько сот километров.)

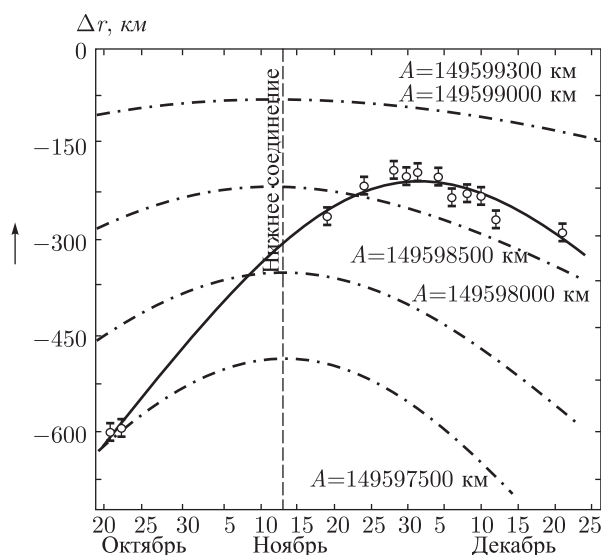


Рис. 4. Изменение во времени разности между измеренным и вычисленным расстоянием от локатора до Венеры

Штрих-пунктирными линиями на рисунке показано, как должна была меняться величина  $\Delta r$  при различных значениях астрономической единицы. В частности, если бы ее значение было точно равно  $A = 149599300$  км, т. е. величине, определенной нами по измерениям 1961 г. и использованной в расчетах, то в отсутствие других ошибок экспериментальные точки должны были совпасть с горизонтальной осью вверху.

Несовпадение экспериментальных точек ни с одной из этих кривых свидетельствует о том, что не только астрономическая единица, но и параметры орбиты Венеры, использованные при расчете расстояния до нее, должны быть уточнены. В частности, если для астрономической единицы взять значение  $149597900$  км, радиус Венеры принять равным  $6020$  км и считать, что фактическое положение центра Венеры на ее орбите смещено относительно расчетного на  $270$  км по движению, то величина  $\Delta r$  будет изменяться так, как показано на рисунке сплошной линией, которая довольно хорошо соответствует расположению экспериментальных точек. Величина этого смещения составляет всего 2% от диаметра Венеры и заметить его оптическими способами было бы очень трудно.

Радиолокационные наблюдения дают нам непосредственно расстояние не до центра Венеры (к которому привязаны все используемые

в расчетах астрономические данные о движении планеты), а расстояние до ближайшей к Земле части ее поверхности (точка  $A$ , рис. 5), которая обуславливает наиболее интенсивное отражение, — т. е. расстояние, меньшее на величину радиуса Венеры. Величина радиуса влияет на изменение  $\Delta r$ , что и позволяет его определить.

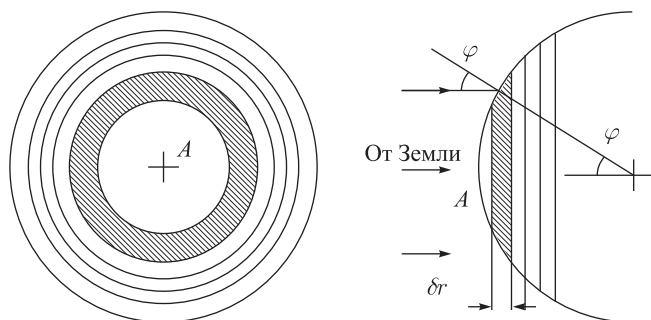


Рис. 5. Кольцевые отражающие зоны на поверхности планеты при облучении ее плоской волной. В пределах каждого кольца отраженные сигналы запаздывают одинаково

Оптические наблюдения в отличие от радиолокационных дают нам радиус внешней границы облачного слоя. Д. Я. Мартынов из наблюдений покрытия Венерой звезды Регул определил этот радиус —  $6100 \pm 34$  км<sup>4</sup>). Взяв разность радиусов по оптическим и радиолокационным наблюдениям, можно найти высоту облаков на Венере. Однако точность произведенных измерений пока для этого еще недостаточна.

Последующие радиолокационные наблюдения, проведенные при других положениях Венеры на ее орбите и обработанные совместно с прежними наблюдениями, очевидно, позволят уточнить не только параметры орбиты и размеры Венеры, но и параметры орбиты Земли.

### Исследование поверхности планет

Космонавта, готовящегося к полету на Венеру, прежде всего будет интересоваться, что он встретит на планете. Представляет ли поверхность Венеры сплошной океан воды или скалистые горы, а может быть, это песчаная пустыня или равнина, залитая нефтью? На эти вопросы планетная радиолокация частично уже дала ответы.

Планета рассеивает радиоволны во все стороны, и в том числе обратно к радиолокатору. Интенсивность отражения в направлении радиолокатора, помимо геометрических размеров планеты, зависит от коэффициента отражения поверхности планеты и ее гладкости.

<sup>4</sup>) См. «Природа», 1961, № 9, стр. 24–31.

Коэффициент отражения поверхности, или «альbedo», как называют его в астрономии, представляет собой отношение энергии, отраженной во все стороны, к энергии, падающей на эту поверхность. Коэффициент отражения определяется материалом отражающей поверхности. Для диэлектриков его величину ( $\rho$ ) можно найти по диэлектрической проницаемости:

$$\rho = \left( \frac{\sqrt{\varepsilon} - 1}{\sqrt{\varepsilon} + 1} \right)^2.$$

Коэффициент отражения некоторых материалов дается в табл. 2.

Для гладких сферических поверхностей интенсивность отражения в направлении радиолокатора определяется только коэффициентом отражения поверхности. Как будет показано ниже, на радиоволнах Венеры отражает в первом приближении как гладкая сфера. Поэтому по интенсивности отраженных радиоволн можно найти коэффициент отражения и затем подобрать подходящий материал поверхности планеты из табл. 2.

Коэффициент отражения поверхности Венеры по измерениям в СССР на волне около 40 см и в США на волнах 68 и 12,6 см составлял 10–15 %, причем величина его ото дня ко дню изменялась сравнительно мало (по нашим измерениям, в пределах  $\pm 3\%$ ). Это говорит о том, что поверхность Венеры в отличие от земной имеет довольно однородное строение. Такой же коэффициент отражения радиоволн у некоторых скальных пород на Земле (см. табл. 2). Величина коэффициента отражения слишком велика, чтобы допустить, что поверхность Венеры сплошь покрыта песком или нефтью, как предположил Хойл. С другой стороны, величина коэффициента отражения слишком мала, чтобы поддержать гипотезу Мензела и Уиппла о сплошном водном океане <sup>5)</sup>.

Таблица 2.

Материал отражающей поверхности	Диэлектрическая проницаемость	Коэффициент отражения (в %)
Кварц кристаллич.	4,5	13
Кварц плавленный	3,5–4,1	9–11,5
Кварцевый песок	3,0	7
Мрамор	8,3	23
Нефть	2,1	3,5
Вода	(проводник)	около 100

<sup>5)</sup> См. «Природа», 1960, № 10, стр. 8–15.

Заметим, что если бы удалось произвести аналогичную радиолокацию Земли с Венеры, то результаты измерения коэффициента отражения получились бы более разнообразными. В течение суток Земля обращена к Венере попеременно песчаными пустынями, плоскогорьями или водными пространствами океанов. В соответствии с этим коэффициент отражения изменялся бы примерно от 7 до 100 %.

Если разделить отражения от элементов поверхности планеты, составляющих различные углы с направлением движения волны, то можно было бы найти зависимость отраженной энергии от этого угла и судить о структуре поверхности планеты. Такой эксперимент был проведен в 1962 г. при радиолокации Венеры с использованием метода пилообразной частотной модуляции.

Фронт излучаемых передатчиком локатора волн, достигая планеты, в первый момент касается ближайшей к Земле точки (точка  $A$  в центре видимого диска планеты, см. рис. 5), а затем захватывает более удаленные зоны ее поверхности, имеющие в плане вид концентрических колец. Благодаря тому, что отражения от более удаленных зон приходят позже, отражения от каждой кольцевой зоны можно выделить в отдельности.

На рис. 6 показано, как меняется энергия отраженных Венерой сигналов  $p$  (в относительных единицах) в зависимости от расстояния  $\Delta R$ , на котором произошло отражение. За нулевое расстояние принято положение точки  $A$  (см. рис. 5). Таким образом, самый большой столбик соответствует энергии сигналов, отраженных от ближайшей к Земле зоны, — шарового сегмента. Первые десять столбиков представляют собой энергию отраженных сигналов кольцевыми зонами глубиной по 38 км каждая; остальные зоны имеют глубину в 4 раза большую<sup>6)</sup>. Энергию, соответствующую отрицательным значениям  $\Delta R$ , вероятно, нужно отнести за счет специфики применяемой модуляции сигнала.

Интенсивность отраженных сигналов убывает с увеличением расстояния примерно по гиперболе  $\left(p = \frac{24}{\Delta R + 24}\right)$ , изображенной на рисунке штрих-пунктирной линией. Как видно из рисунка, удавалось зарегистрировать энергию, отраженную зонами, удаленными от Земли на 1500 км дальше, чем ближайшая точка Венеры. По этим данным была найдена зависимость энергии отраженных сигналов  $p$  от угла падения  $\varphi$  (см. рис. 5). Эта зависимость изображена на рис. 7 сплошной линией (энергия дана в относительных единицах, масштаб — логарифмический). Для сопоставления на том же рисунке пунктирными линиями приведены аналогичные зависимости, полученные при радиолокации Луны на волнах длиной 68 и 3,6 см.

Приведенные зависимости определяются шероховатостью поверхности Венеры и Луны. Для совершенно гладкой сферы зависимость

<sup>6)</sup> Глубина зон определяется разрешающей способностью аппаратуры.

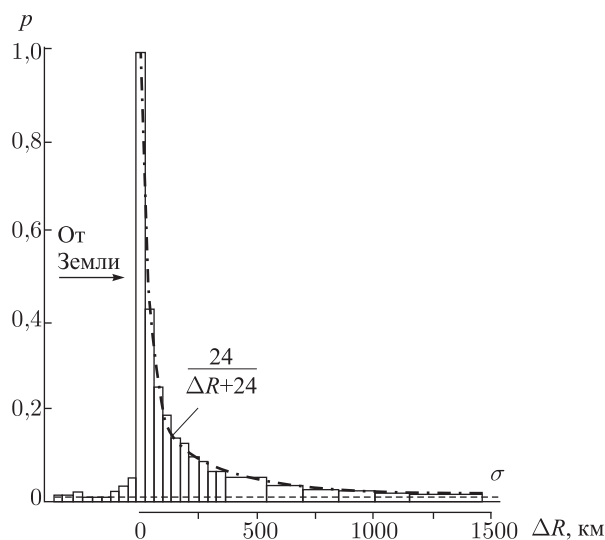


Рис. 6. Распределение энергии отраженных сигналов по расстоянию относительно ближайшего к Земле участка поверхности Венеры. Пунктиром отмечена величина погрешности ( $\sigma$ ), вызываемой шумами аппаратуры

$p(\varphi)$  резко обрывается с ростом угла падения, так как отраженные волны поступают назад к радиолокатору только лишь от малого пятна в центре видимого диска сферы. С другой стороны, очень шероховатая сферическая поверхность дает медленное изменение  $p(\varphi)$  от угла падения.

Одна и та же поверхность может отражать не одинаково на разных волнах, так как шероховатость определяется соотношением размера неровностей и длины волны. Так, например, световые волны отражаются Луной приблизительно по закону Ломмеля–Зеелигера (штрих-пунктирная линия, см. рис. 7), как от очень шероховатой сферы, в то время как на более длинных радиоволнах отражение приближается по характеру к отражению от гладкой поверхности. В полнолуние весь диск Луны имеет примерно одинаковую яркость, как в центре, так и у краев. Совершенно другая картина представилась бы нам, если бы глаза могли различать радиоволны: яркое пятно в центре лунного диска и совершенно темные края. Так же отражаются радиоволны и Венерой.

Сопоставление данных, приведенных на рис. 7, позволяет сделать важный вывод, что для волны около 40 см поверхности Венеры и Луны имеют примерно одинаковую структуру неоднородностей.

Радиолокация Марса, проведенная в 1963 г. одновременно в СССР и США, позволила получить данные о коэффициенте отражения поверхности этой планеты на волнах около 40 и 12,6 см соответственно.

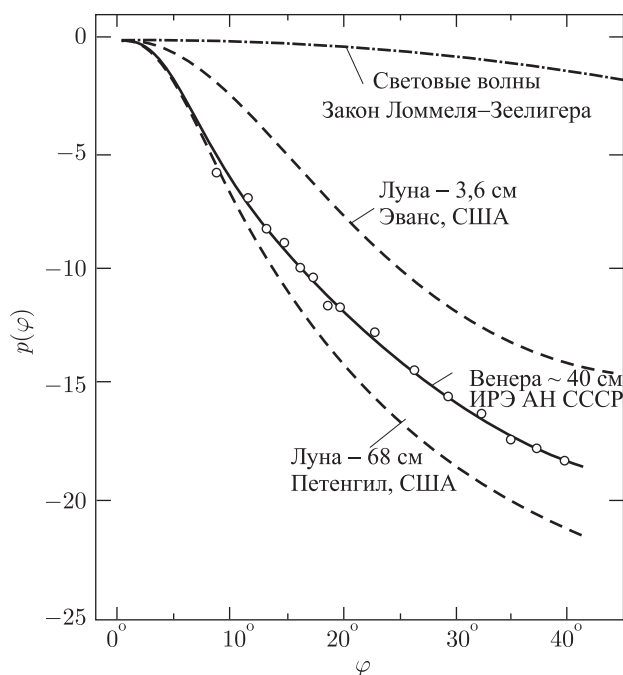


Рис. 7. Зависимость отраженной энергии от угла падения волн для Венеры и Луны

На рис. 8 изображена карта Марса, горизонтальной линией на ней отмечена область, от которой у нас были получены отраженные сигналы.

Коэффициент отражения поверхности менялся в широких пределах по мере того, как Марс поворачивался к Земле различными сторонами. Следовательно, состав поверхности на Марсе должен быть более разнообразным, чем на Венере. В нижней части рисунка, под картой Марса, показано, как изменялся коэффициент отражения поверхности в зависимости от долготы области, отражавшей сигналы, по наблюдениям в СССР (жирная линия) и США (тонкая линия). Обе кривые имеют некоторую взаимную корреляцию. По этим данным как будто следует, что более темные области, условно называемые морями, отражают лучше светлых, называемых материками.

Средний коэффициент отражения поверхности Марса получился по нашим наблюдениям равным 7% (как и у Луны), а в США — в два раза меньше. Возможно, такое явление связано с изменением характера отражения с укорочением волны.

Характер спектра отраженного сигнала свидетельствовал о наличии на Марсе очень гладких протяженных участков поверхности.

В наших наблюдениях в некоторые дни отражения совсем не удалось зарегистрировать. Возможно, что это было вызвано изменением

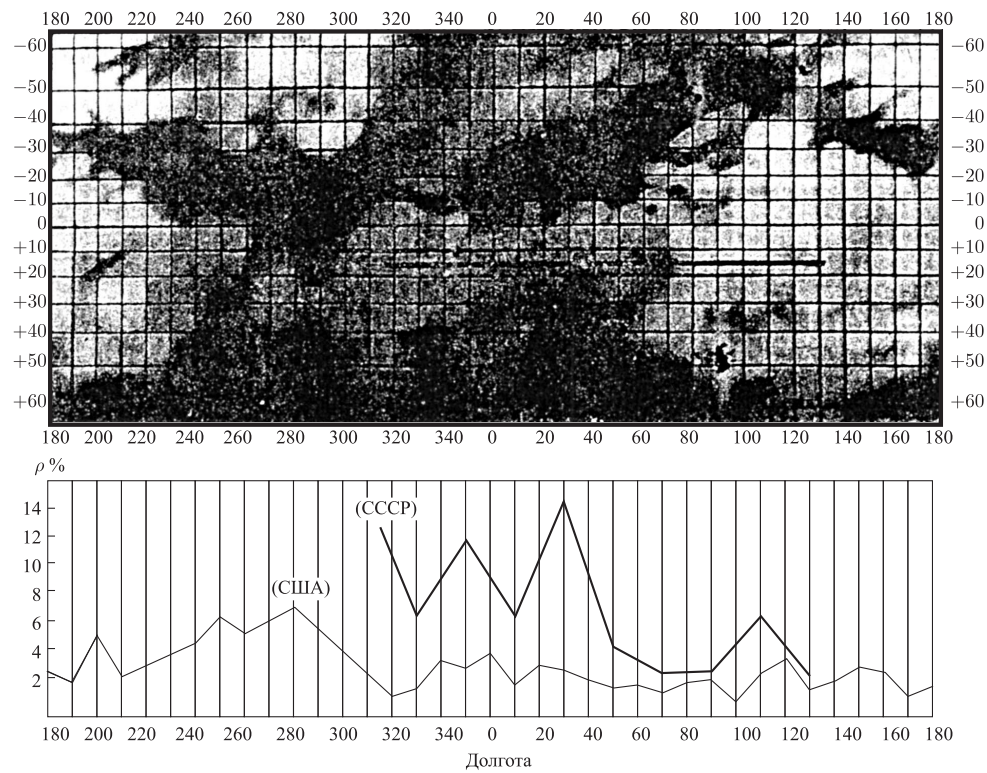


Рис. 8. Астрономическая карта Марса и изменение коэффициента отражения его поверхности по наблюдениям в СССР и в США (Голдштейн и Гилмар, 1963)

отражающих свойств Марса. Последующие наблюдения, проведенные с более чувствительной аппаратурой, позволят получить более полные данные о поверхности Марса.

### Период вращения Венеры

До проведения радиолокационных наблюдений период вращения Венеры и наклон ее оси были довольно неопределенны. Период оценивался величиной от 15 час. до 225 суток<sup>7)</sup>. При радиолокации Венеры в 1962 г. в СССР и в США было произведено определение периода вращения этой планеты по расширению спектра сигналов при отражении от ее поверхности.

Различные элементы поверхности вследствие вращения планеты имеют по отношению к локатору различные скорости. Из-за эффекта Доплера частота сигналов при отражении смещается в соответствии со скоростью отражающих элементов. Так, например, точка *a* (рис. 9), движущаяся на нас, дает отражения на более высокой частоте, чем точка *b*, которая от нас удаляется, а отражения от точки *c* будут иметь еще более высокую частоту из-за большей скорости этой точки.

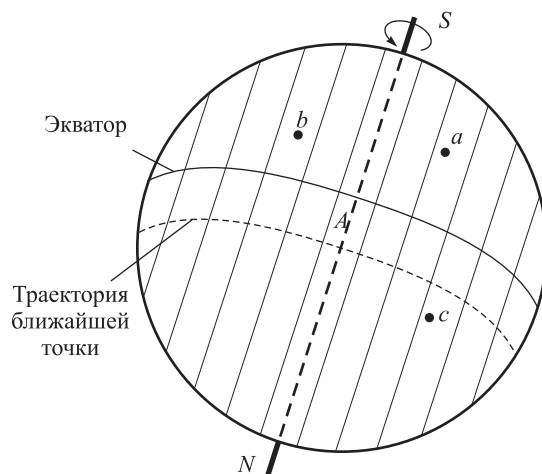


Рис. 9. Схема, поясняющая расширение спектральной линии сигнала при отражении от вращающейся планеты. В пределах каждой полоски отраженные сигналы получают одинаковое смещение частоты. Точки *a* и *c* движутся к наблюдателю, *b* — от него

Спектр отраженных сигналов, полученный при монохроматическом облучении Венеры на частоте около 700 МГц, представлен на рис. 10. Стабильность частоты передатчика была достаточной, чтобы исполь-

<sup>7)</sup> См. «Природа», 1960, № 10, стр. 8–15.



зовать для анализа фильтры с шириной полосы пропускания по 1 Гц. Специальное устройство, компенсировавшее во время измерений среднее смещение частоты сигналов, вызываемое относительным движением локатора и центра Венеры, также не вносило заметных ошибок. Каждый столбик на этом рисунке представляет энергию сигналов, отраженных элементами поверхности, проектирующимися на видимый диск планеты в виде полос, параллельных оси вращения (см. рис. 9).

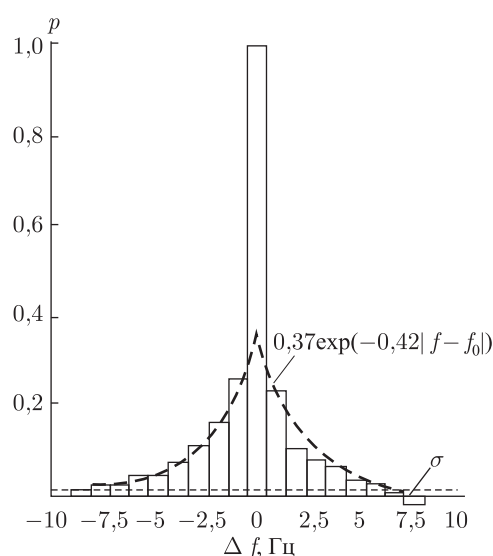


Рис. 10. Средний спектр отраженных от Венеры сигналов при монохроматическом облучении на частоте около 700 МГц,  $\Delta f$  — смещение частоты из-за вращения планеты. Эти данные можно аппроксимировать экспоненциальной зависимостью, показанной штрих-пунктирной линией. Пунктир обозначает величину погрешности от шумов аппаратуры

Спектр отраженных сигналов в разные дни был неодинаковой ширины. Это указывает на то, что вращение Венеры относительно локатора менялось. Такое относительное вращение (его можно было бы заметить, наблюдая в телескоп за перемещением деталей на поверхности Венеры, если бы она не была закрыта облаками) вызывается двумя причинами: собственным вращением Венеры, которое имеет постоянную величину и должно быть определено, и кажущимся обеганием Венеры Землей, зависящим от их взаимного положения. Происхождение последней составляющей можно уяснить на примере человека, который обходит глобус. Хотя глобус неподвижен, создается впечатление, что он вращается навстречу движению. Эту составляющую можно вычислить теоретически.

Изменение скорости относительного вращения Венеры, вычисленной для разных значений периода  $T$  в случае, когда ось планеты перпендикулярна плоскости орбиты, изображено на рис. 11. Кривая при  $T = \infty$  получилась если бы планета не вращалась; при  $T = 225$  суткам (время обращения Венеры вокруг Солнца) планета была бы повернута к Солнцу всегда одной и той же стороной (как Луна к Земле). Отрицательные значения периода соответствуют вращению Венеры в сторону, обратную ее движению вокруг Солнца.

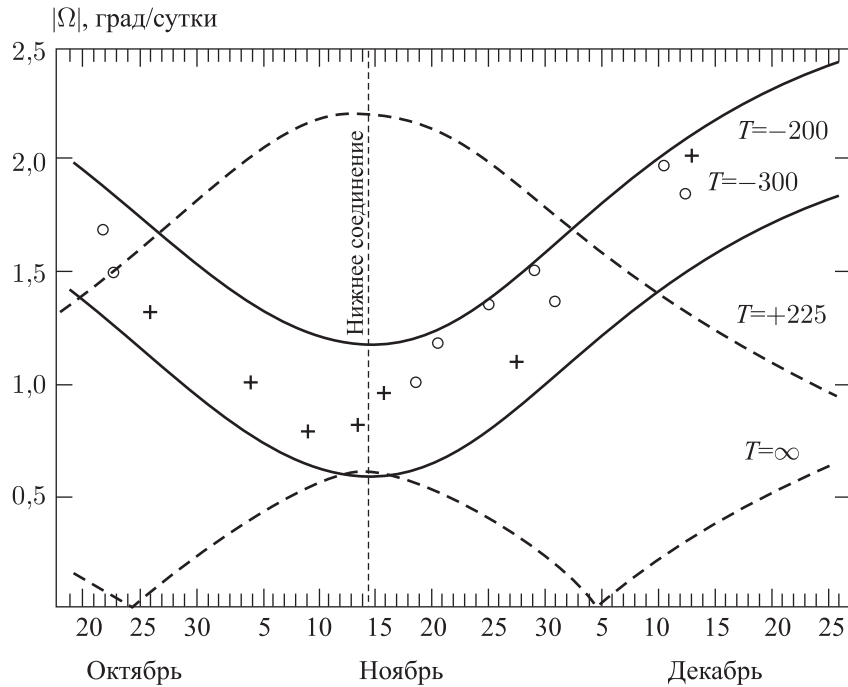


Рис. 11. Определение периода вращения Венеры по наблюдениям в СССР (кружочки) и в США (крестики).  $\Omega$  — угловая скорость вращения Венеры относительно локатора

На этом же рисунке нанесены экспериментальные точки, полученные по наблюдениям в СССР и в США (Голдштейн и Карпентер, 1963 г.). Для этого экспериментально полученный в различные дни наблюдения спектр сравнивался со спектром, который можно вычислить, задаваясь определенными значениями скорости вращения, по данным зависимости отраженной энергии от угла падения волн (см. рис. 7).

Как видно из рисунка, экспериментальные данные лучше всего соответствуют обратному вращению с периодом 200–300 земных суток.

Хорошее совпадение экспериментальных данных, полученных независимо на волнах 40 и 12,6 см, говорит о том, что на этих волнах отражения получаются непосредственно от самой поверхности Венеры. В свете этого не подтверждаются предположения, что на волнах порядка 40 см радиолокационные сигналы отражаются от ионосферы Венеры, не достигая поверхности планеты <sup>8)</sup>.

Существует мнение, что наличие у планеты магнитного поля обуславливается ее вращением. Это соответствие можно проследить у тех небесных тел, для которых известен период вращения и величина магнитного поля. Так, Земля и Юпитер (наличие сильного магнитного поля у последнего подтверждается данными радиоастрономических наблюдений) представляют пример планет с быстрым вращением и сильным магнитным полем. С другой стороны, для Луны, которая совершает один оборот за 27 суток, отсутствие заметного магнитного поля было доказано прямыми измерениями при полете советских Лунников в 1959 г. Поэтому медленное вращение Венеры, видимо, может служить косвенным свидетельством отсутствия у этой планеты сильного магнитного поля.

Полет американского аппарата «Маринер-2», прошедшего вблизи Венеры в декабре 1962 г., наличия магнитного поля не зафиксировал.

Следующая задача планетной радиолокации — *более детальное исследование поверхности планет*. Хотя антенна радиолокатора не обладает той высокой разрешающей способностью по углу, какую дают оптические телескопы, разделение сигналов по времени и по частоте позволяет, как мы видели, разделять отражения, приходящие от различных элементов поверхности планеты.

При достаточно чувствительной аппаратуре по этим данным можно построить карту радиолокационных отражений и получить новые данные о планетах солнечной системы.

---

<sup>8)</sup> См. «Природа», 1963, № 9, стр. 68–71.