

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

523.4

РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ПЛАНЕТ *)

И. Шапиро

Эхо-сигналы высокочастотных радиоволн, посланных к планетам с Земли, позволили осуществить новую проверку общей теории относительности и получить точные значения аномальных скоростей вращения Меркурия и Венеры.

Еще десятилетие назад планетная радиолокационная астрономия была лишь мечтой немногих радиоинженеров и физиков. Однако уже в 1961 г. были приняты первые эхо-сигналы, отраженные от Венеры. Вскоре последовали радиолокационные контакты с Меркурием и Марсом. Хотя радиолокационная астрономия является еще очень молодой наукой, она уже дала результаты, научное значение которых значительно превзошло самые оптимистические предсказания. Новыми методами радиолокационной астрономии можно, например, исследовать вращение и орбитальное движение планет, характеристики их поверхностей и свойства среды, через которую проходят радиолокационные сигналы. Полученные к настоящему времени экспериментальные научные данные и теоретические исследования в этой области настолько обширны, что их невозможно рассмотреть в одной статье. Поэтому наше внимание будет сосредоточено лишь на некоторых наиболее важных результатах — новой проверке общей теории относительности Эйнштейна и наиболее неожиданных открытиях, касающихся вращения Меркурия и Венеры.

Сущность планетной радиолокации состоит в том, чтобы послать к далекой планете надлежащим образом управляемый и тщательно контролируемый радиосигнал, обнаружить отраженный от планеты эхо-сигнал и провести его анализ для извлечения информации, которую он приносит. Чтобы такой анализ можно было выполнить, энергия эхо-сигнала должна быть достаточно большой по сравнению с естественными шумовыми помехами. Поскольку плотность энергии как излученных, так и отраженных радиоволн уменьшается обратно пропорционально квадрату расстояния между радиолокатором и планетой, энергия эхо-сигнала, принимаемого антенной радиолокатора, изменяется обратно пропорционально четвертой степени этого расстояния (рис. 1). Следовательно, имеются огромные различия в относительной трудности обнаружения разных объектов солнечной системы. Так, например, шаг вперед от обнаружения эхо-сигнала от Луны до обнаружения эхо-сигнала от Венеры (при ее ближайшем приближении к Земле) потребовал улучшения чувствительности радиолока-

*) Irvin I. Shapiro, Radar Observations of the Planets, Sci. American 219 (1), 28 (1968). Перевод с небольшими сокращениями выполнен Г. М. Петровым. Статья отражает основные результаты радиолокационных наблюдений планет, проведенных в последнее время в США.

ционных систем почти в 10 миллионов раз. Однако для такого прогресса потребовалось всего лишь 15 лет.

Основными инструментами, используемыми в настоящее время в США для планетной радиолокационной астрономии, являются Хайстекский радиотелескоп в Тингсборо, принадлежащий Линкольнской лаборатории (рабочая частота 7840 Мгц), Аресибский 300-м радиотелескоп в Пуэрто-

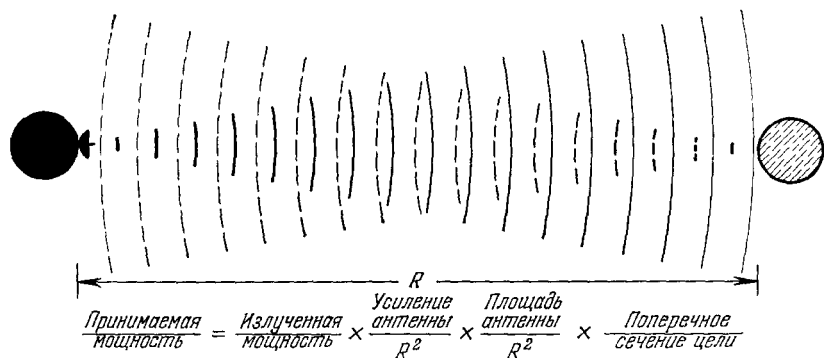


Рис. 1. Радиолокационное уравнение показывает, что энергия принятого сигнала обратно пропорциональна четвертой степени расстояния (R). Планета (справа) пересекает очень малый сегмент общего сферического волнового фронта, распространяющегося от передатчика радиолокатора. Приемник в свою очередь может собирать только малую долю сигнала (штриховой волновой фронт), возвращенного планетой.

Рико (40 и 430 Мгц) и Голдстоунский радиолокатор Лаборатории реактивного движения Калифорнийского института (2388 Мгц) (рис. 2). Эти три станции непрерывно совершенствуются и конкурируют между собой по общей чувствительности системы. По сравнению с радиолокационными системами 1961 г. их чувствительность в настоящее время повышена примерно в 1000 раз.

В качестве примера можно привести энергетические характеристики Хайстекского радиолокатора: он может излучать непрерывные сигналы мощностью до 400 *квт* и обнаруживать в стандартном режиме эхо-сигналы почти на 27 порядков меньше излучаемой величины — около 10^{-21} *вт*. Такие слабые сигналы выделяются из значительно более сильного случайного шумового сигнала, возникающего во входных цепях приемника. Выделение сигналов производится путем обработки на вычислительной машине.

Если принять во внимание ведущиеся на протяжении столетий оптические наблюдения планет, может показаться странным, каким образом всего лишь за несколько лет радиолокационные наблюдения смогли внести важный вклад в изучение планетных орбит. Значимость радиолокационных данных обусловлена двумя факторами. Во-первых, радиолокатор добавляет два новых вида измерений: измерение запаздывания эхо-сигнала, которое через скорость света связано с расстоянием, проходимым радиосигналами до планеты и обратно, и измерение доплеровского смещения частоты, дающего радиальную скорость отражающей поверхности вдоль линий визирования. Во-вторых, многие из радиолокационных измерений имеют беспрецедентную точность. Например, точность, превышающая одну стомиллионную долю (10^{-8}), достигнутая при измерениях времени распространения сигнала до планеты и обратно, стала в настоящее время обычной.

Чем вызвано желание добавить еще дополнительные значащие цифры в выражение для орбитальных положений планет? Одна из причин состоит

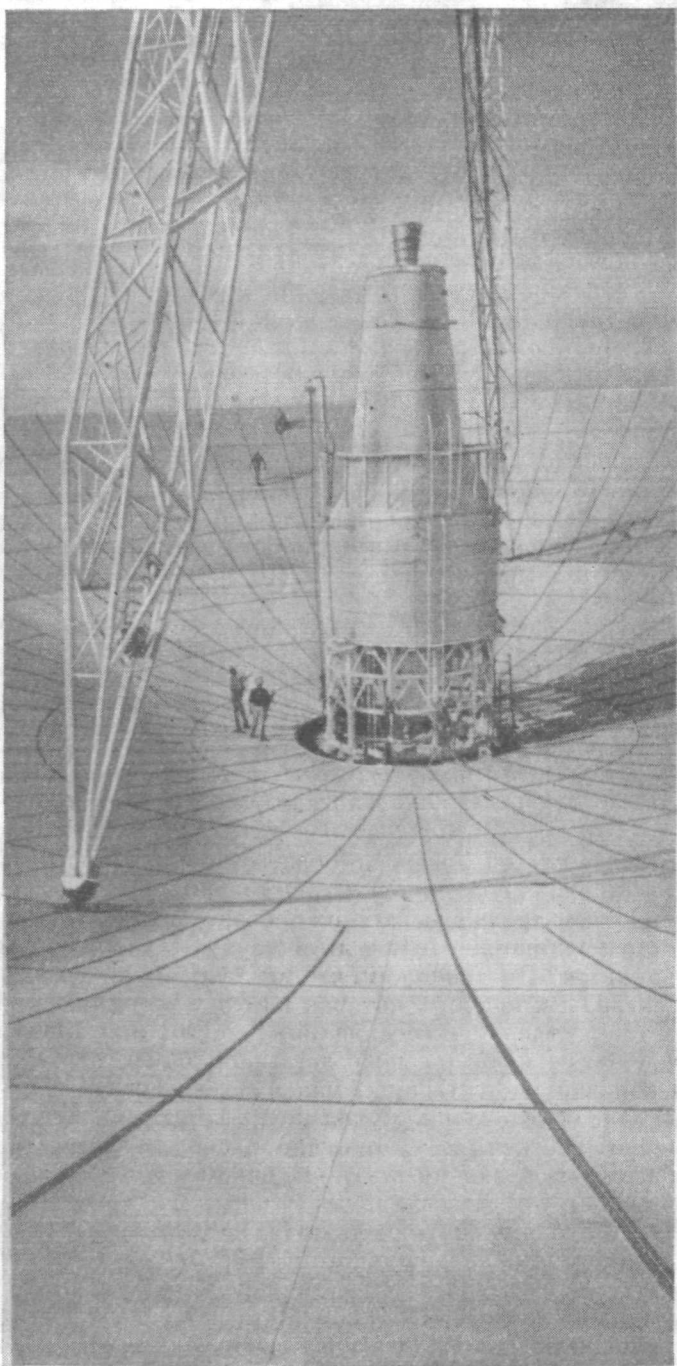


Рис. 2. 64-м алюминиевая антенна в Голдстоуне эксплуатируется Лабораторией реактивного движения Калифорнийского института. В настоящее время она используется для планетной радиолокационной астрономии. Большой размер и почти точная параболическая поверхность полотна антенны делают ее чувствительным инструментом для направления радиолокационных сигналов к планете и обнаружения эхосигналов, отражаемых планетой. В «конусе питания», находящемся в центре полотна, помещается как передатчик, так и приемник радиолокатора. Сигналы передатчика попадают на полотно антенны после отражения от дополнительного рефлектора, расположенного над антенной (на фотографии рефлектор не виден).

в том, что при планировании межпланетных полетов на космических кораблях знание расстояния до планеты является жизненно необходимым. Межпланетные расстояния принято выражать в астрономических единицах длины (среднее расстояние между Землей и Солнцем). До 1961 г. соотношение между астрономической единицей и километром было известно с точностью всего только около одной тысячной доли (10^{-3}). Так как ни одна из планет не приближается к Земле ближе чем на 40 млн. км, ошибка 0,1% могла быть очень серьезной! Измерения времени межпланетного распространения сигналов и доплеровского сдвига их частоты, выполненные в 1961 г. Г. Петтенгилом и др. в Линкольнской лаборатории, а также Р. Голдстейном, Д. Мулиманом и др. в Лаборатории реактивного движения, значительно способствовали успеху полета «Маринера-2» к Венере в 1962 г. Недавно (в 1967 г.) М. Аш, У. Смит и автор, используя радиолокационные данные Линкольнской и Аресибской обсерваторий *), установили эквивалент астрономической единицы в световых секундах с точностью около одной стомиллионной доли (10^{-8}). При этом, однако, эквивалент астрономической единицы в километрах остается пока менее точным, так как скорость света в настоящее время известна с точностью только около одной миллионной доли (10^{-6}).

Точное знание межпланетных расстояний в дополнение к практической ценности имеет также важное теоретическое значение: чем точнее мы знаем положение планет, тем достовернее мы можем проверить физические законы, с помощью которых пытаемся объяснить их движение. Эти законы заключены, например, в общей теории относительности Эйнштейна, которая до этого была подвергнута только трем экспериментальным проверкам. Как было показано автором в 1964 г., улучшение чувствительности планетных радиолокаторов делает технически осуществимой четвертую проверку ее. Согласно общей теории относительности свет и радиоволны, проходя вблизи Солнца, не только отклоняются (что составляет основу одной из трех классических проверок общей теории относительности), но и замедляются. Можно ли измерить такое замедление с помощью радиолокатора? Предположим, что мы непрерывно излучаем радиолокационные сигналы к планете, которая по отношению к Земле находится за Солнцем, т. е. в «верхнем соединении» (рис. 3). Было предсказано, что при прохождении сигнала в непосредственной близости к Солнцу (почти касательно к поверхности Солнца) максимальное увеличение запаздывания эхо-сигнала, обусловленное указанным замедлением, должно составлять примерно 200 мксек, т. е. около одной десятимиллионной доли общего запаздывания эхо-сигнала. Экспериментальная задача, следовательно, состоит в том, чтобы найти эту очень малую разницу. Конечно, прежде всего необходимо знать, каких запаздываний эхо-сигналов следует ожидать в отсутствие релятивистского эффекта. Для этого орбиты Земли и наблюдаемой планеты должны быть определены значительно точнее, чем было возможно прежде. Эта промежуточная задача достигается предварительным проведением большого количества точных радиолокационных измерений запаздываний и доплеровских смещений частоты эхо-сигналов, последующая обработка которых дает возможность определить орбиты и такие необходимые величины, как массы и радиусы наблюдаемых планет. Применяя такой способ, мы можем сейчас очень точно предсказывать движение планет и предвычислять время распространения радиосигналов

*) В упомянутой работе авторы использовали также данные, полученные при радиолокации Венеры в Советском Союзе, которые были направлены им по просьбе И. Шапиро. (Прим. перев.)

до планеты и обратно с точностью до 10 мксек, что соответствует расстоянию около 1,5 км.

До сих пор для упрощения допускалось, что среда между Землей и наблюдаемой планетой не влияет на распространение радиолокационного сигнала. Наиболее существенным для рассматриваемой задачи является влияние, оказываемое плазмой солнечной короны, которая также стремится уменьшить скорость распространения радиолокационного сигнала. К счастью, это замедление можно отличить от соответствующего релятивистского эффекта: влияние плазмы обратно пропорционально квадрату частоты радиолокационного сигнала, в то время как релятивистский эффект не должен изменяться с частотой. Остается главный вопрос: каким образом и можно ли вообще измерить запаздывание эхосигналов с точностью до 10 мксек, если учесть, что планета представляет собой огромный объект и что радиолокационный луч все же шире ее угловых размеров? Основной смысл ответа на этот вопрос состоит в том, что планета отражает радиоволны почти зеркальным образом, т. е. отражает их почти так же, как полированный металлический шар отражает свет. Поэтому большая часть энергии эхосигналов сосредоточена в отражениях от ближайших к Земле участков поверхности (центра видимого диска планеты). Дальнейшее совершенствование в определении запаздывания сигнала достигается посредством съемки радиолокационной карты, осуществляемой путем разделения принятых сигналов по запаздыванию и доплеровскому смещению частоты. Этот метод, предложенный в 1959 г. сотрудником Линкольнской лаборатории П. Грином, является основным методом радиолокационной астрономии. Он основывается на следующей предпосылке: планета настолько велика по сравнению с длиной волны радиолокационного сигнала, что ее поверхность можно рассматривать состоящей из множества отдельных элементов, каждый из которых отражает сигнал независимо от других. Поэтому полагают, что каждый элемент поверхности отражает падающий волновой фронт со своим определенным запаздыванием во времени и сообщает этому отражению свой, отличный от других доплеровский сдвиг частоты.

Если излучение состоит из коротких импульсов, то эхосигнал, принятый в какой-либо конкретный момент времени, будет соответствовать отражениям от ряда точек, имеющих одинаковое расстояние от Земли. Эти точки определяют контуры одинакового запаздывания, которым на поверхности планеты соответствуют кольца, перпендикулярные к линии,

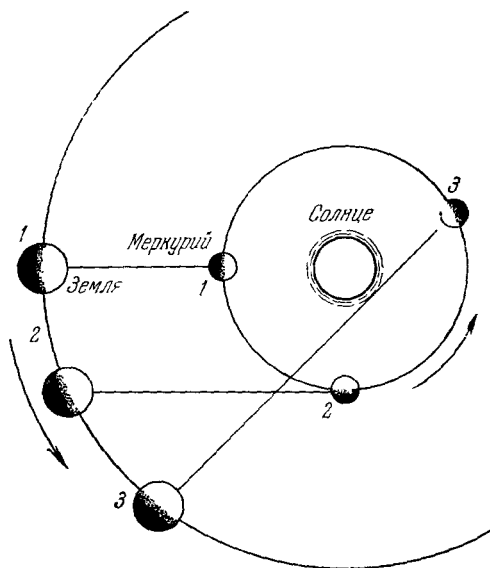


Рис. 3. Влияние Солнца на время распространения радиолокационных сигналов между Землей и Меркурием в нижнем соединении (1) и элонгации (2) очень незначительно, но вблизи верхнего соединения (3), как предсказывает общая теория относительности, радиолокационные сигналы будут замедляться. Это замедление будет особенно заметно при прохождении сигналов в непосредственной близости к Солнцу.

направленной от радиолокатора к центру планеты. Аналогично имеются контуры одинакового доплеровского сдвига. Если смотреть от радиолокатора, то наблюдаемая планета будет иметь определенное «кажущееся» вращение, которое является результатом относительного движения планеты и Земли и собственного вращения планеты вокруг оси. Каждый отражающий элемент поверхности вследствие кажущегося вращения имеет свою скорость относительно радиолокатора и поэтому сообщает радиолокационному сигналу свой характерный доплеровский сдвиг частоты: элемент поверхности, движущийся по направлению к Земле, отражает эхо-сигнал с частотой большей, чем частота излученного сигнала; элемент, движущийся от Земли, отражает эхо-сигнал с меньшей частотой. Точки поверхности, сообщаемые падающему сигналу одинаковый доплеровский сдвиг, образуют на поверхности планеты полуокружность, плоскость которой параллельна плоскости, проведенной через ось кажущегося вращения планеты и местоположение радиолокатора (рис. 4).

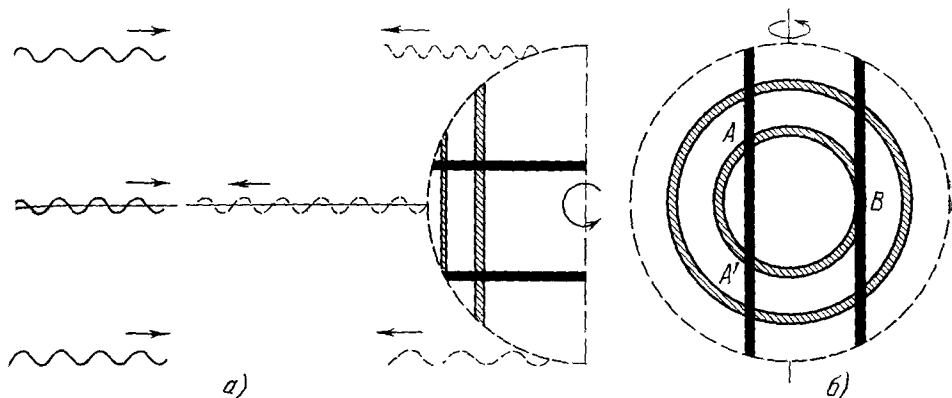


Рис. 4. Получение радиолокационной карты основано на разделении эхо-сигналов от разных отражающих областей по запаздыванию и частоте. Посланный сигнал (сплошные волны) отражается сначала от ближайшей к Земле точки поверхности планеты (на линии от радиолокатора до центра планеты), а позднее — от областей, лежащих ближе к краю диска (а). Кроме того, отраженные сигналы (штриховые волны) получают разный доплеровский сдвиг частоты: эхо-сигналы от верхнего края, приближающегося к Земле, имеют более высокую частоту, чем эхо-сигналы от ближайшей точки; сигналы от удаляющегося нижнего края имеют меньшую частоту. Зоны одинакового запаздывания (заштрихованные) лежат в плоскостях, перпендикулярных линии визирования. Зоны одинакового доплеровского сдвига (темные) лежат в плоскостях, параллельных оси кажущегося вращения и линии визирования. На поверхности планеты (б) эти плоскости образуют контуры запаздывания (кольца) и доплеровского смещения (полосы). Имеется двукратная неоднозначность в съемке карты (А и А'), за исключением областей, лежащих на кажущемся экваторе, где зоны пересечений контуров В увеличены.

Сочетание контуров одинаковых запаздываний и одинаковых доплеровских сдвигов образует координатную сетку и дает возможность получить радиолокационную карту поверхности планеты, на которой энергия эхо-сигналов, отраженных от элементов поверхности изображается в зависимости от запаздывания и частоты (рис. 5). Такая карта имеет необычное свойство: так как одинаковый доплеровский сдвиг при данном запаздывании сообщается сигналу двумя различными точками поверхности, для всех точек, не лежащих на кажущемся экваторе, имеется двукратная неоднозначность.

Как применяется принцип радиолокационного картографирования, чтобы точно зафиксировать те значения запаздывания и доплеровского

сдвига, которые соответствуют отражениям именно от ближайшей к Земле точки поверхности? Сначала путем усреднения многих наблюдений, выполненных вблизи нижнего соединения планеты, когда она находится на наименьшем расстоянии от Земли и, следовательно, эхосигнал от нее имеет наибольшую интенсивность, создается двумерный «эталонный образец» ожидаемой формы эхосигнала (вернее, электронная запись распределения его энергии как функции от двух координат — запаздывания и доплеровского сдвига). В дальнейшем в любом положении планеты на орбите эталонный образец, изменяемый надлежащим образом, показывает ожидаемую энергию эхосигнала относительно ближайшей точки. Неизвестными будут только величины запаздывания и доплеровского сдвига, соответствующие отражению от ближайшей точки. Эти величины получаются путем взаимной корреляции фактически принятого сигнала с эталонным образцом. Наилучшими оценками запаздывания и доплеровского смещения частоты для эхосигнала от ближайшей точки являются такие их значения, при которых взаимная корреляция максимальна. Этот метод, предложенный сотрудниками Линкольнской лаборатории Р. Прайсом, с 1966 г. применяется при радиолокации планет в Хайстеке.

Из наблюдений Венеры вблизи верхнего соединения 1966 г. и Меркурия вблизи трех верхних соединений 1967 г. Г. Петтенгил, М. Аш, М. Стоун, У. Смит, Р. Инголс, Р. Брокельман и автор сделали заключение, что притяжение Солнца действительно уменьшает скорость распространения электромагнитных волн приблизительно на величину, предсказываемую общей теорией относительности. При этом экспериментальная неопределенность была около 20% (рис. 6). Необходимо отметить, что точность четвертой проверки общей теории относительности можно было бы значительно увеличить, используя сигналы, ретранслируемые либо космическим кораблем, либо радиомаяком, посаженным на поверхность планеты.

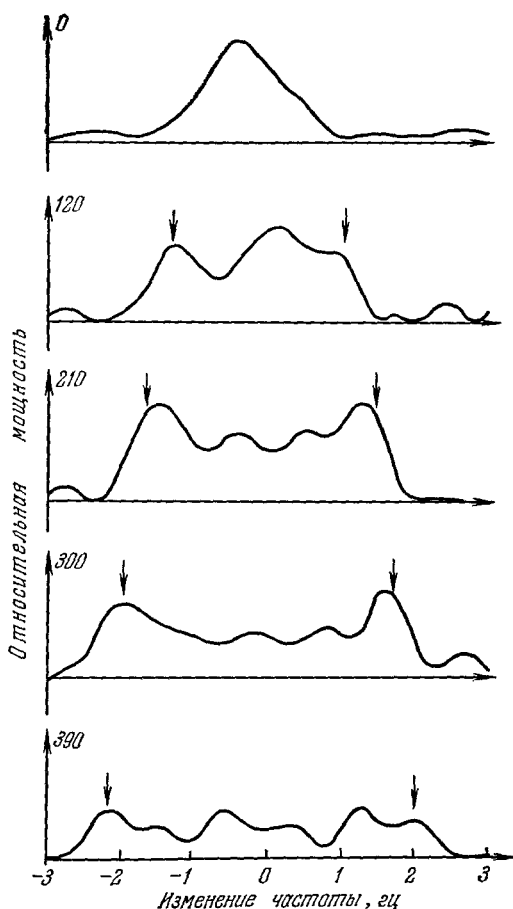


Рис. 5. Спектры эхосигналов от Меркурия дают необработанную радиолокационную карту поверхности. Энергия эхосигнала, отраженного от каждого из пяти контуров запаздывания вплоть до запаздывания 390 мксек относительно ближайшей точки, нанесена как функция смещения частоты. Стрелки показывают положения кромок спектров (увеличенных областей пересечения контуров на кажущемся экваторе), которые соответствуют периоду вращения Меркурия, равному 59 суткам. Спектры получены в Аресибской обсерватории.

Рассмотренные выше измерения запаздывания и доплеровского смещения частоты могут быть использованы также для улучшения точности третьей классической проверки общей теории относительности—измерения углового движения перигелия орбиты Меркурия. Эти измерения позволят также обнаружить, сжимается ли Солнце и изменяются ли гравитационные

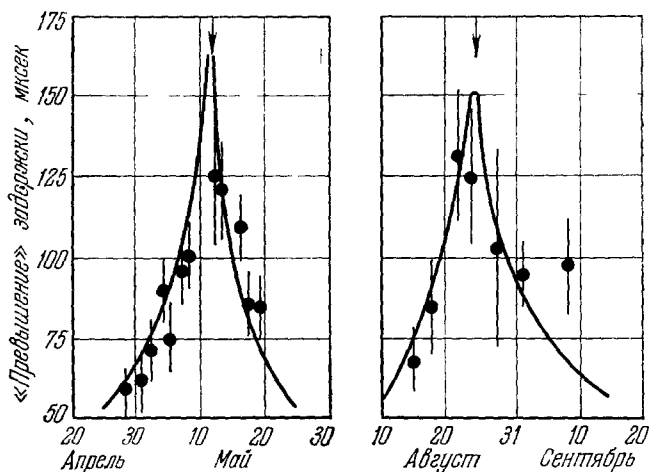


Рис. 6. Влияние солнечного притяжения на запаздывание эхо-сигналов от Меркурия, измеренное вблизи двух верхних соединений 1967 г. (стрелки), было приблизительно равно предсказанному на основе общей теории относительности. Предсказанное увеличение запаздывания, вызываемое Солнцем, показано линиями. Были измерены фактические запаздывания эхо-сигналов и определены их отклонения относительно запаздываний, вычисленных на основе радиолокационных определений орбит. Измеренные значения нанесены черными кружками (вертикальными отрезками показаны ошибки измерений).

силы во времени. Такие выводы зависят главным образом от постепенного накопления малых влияний. Поэтому они будут становиться все более точными по мере накопления измерений за длительный многолетний период. Например, изменение гравитационных констант менее чем в одну десятиллионную долю можно было бы различить в пределах последующих пяти лет.

Наиболее поразительные открытия, сделанные с помощью планетных радиолокационных наблюдений, касаются скоростей вращения Меркурия и Венеры. Может показаться странным, что их скорости не были хорошо известны из оптических наблюдений. Астрономы действительно думали, что знают скорость вращения Меркурия, но, как выяснилось, эти знания были ошибочными. Венера же закрыта покровом плотной атмосферы, которая делает невозможными оптические наблюдения ее поверхности.

В начале XIX века немецкий наблюдатель Г. Шрётер обнаружил на Меркурии горы высотой до 20 км и сделал много зарисовок его поверхности, анализируя которые математик Ф. Бессель пришел к выводу, что период вращения Меркурия точно равен земным суткам. Некоторые астрономы отнеслись к этому результату скептически, однако многие нашли приемлемым считать, что Меркурий, подобно Марсу, имеет такую же длительность дня, как и Земля. Только в 1880 г. была показана ошибочность этого утверждения. Обширная серия наблюдений Ж. Скиапарел-

ли убедила тогда почти всех, что Меркурий вращается значительно медленнее. Сам он сделал вывод, что вращение Меркурия синхронно с его орбитальным движением, т. е. что Меркурий делает один оборот вокруг оси за время каждого оборота вокруг Солнца. С этого времени до весны 1965 г. все наблюдения — а их было буквально несколько сотен — интерпретировались как согласующиеся с синхронным периодом, равным 88 суткам.

Весной 1965 г. Г. Петтенгил и Р. Дэйс, используя радиолокационные наблюдения, выполненные в Аресибо, довольно убедительно показали, что период собственного вращения Меркурия составляет 59 суток. Основой этого радиолокационного определения было опять же составление карты по запаздыванию и частоте: чем быстрее кажущееся вращение планеты, тем больше разница по частоте между отражениями двух сторон каждого кольцевого контура запаздывания (см. рис. 5). Выполнение большого числа таких измерений в разных положениях планеты на орбите позволило разрешить многие неоднозначности и установить скорость вращения планеты.

Как можно интерпретировать полученный результат измерения собственного вращения Меркурия? Представляет ли он стабильное конечное состояние или промежуточную стадию эволюции к синхронному вращению? Сотрудники Корнелльского университета С. Пил и Т. Голд предположили, что вследствие большого эксцентриситета орбиты Меркурия существующее вращение могло быть стабилизировано средним вращательным моментом, оказываемым Солнцем на приливную выпуклость, которую солнечное притяжение вызывает на поверхности Меркурия. Вскоре после этого Ж. Коломбо обратил внимание на то, что период 59 суток составляет почти две трети от орбитального периода Меркурия, равного 88 суткам. Он высказал предположение, что вращение Меркурия могло быть захвачено его орбитальным движением в орбитально-вращательный резонанс с соотношением периодов $3/2$, вследствие чего планета, по-видимому, вращается точно полтора раза в течение каждого обращения вокруг Солнца (рис. 7). Ж. Коломбо и автор развили затем математическую модель, учитывающую приливные трения и крутящий момент, оказываемый Солнцем на любую постоянную асимметрию в распределении массы Меркурия, и нашли, что такой резонансный захват возможен и что он действительно был бы стабилен. П. Голдрих и С.Пил пришли к такому же выводу, показав при этом, что вероятность захвата в состояние полуторного резонанса могла бы быть оценена как один шанс из пяти.

Вычисление указанной вероятности основывалось на том, что существующий в настоящее время эксцентриситет орбиты Меркурия сохранялся и в прошлом — в процессе захвата в орбитально-вращательный резонанс. В действительности же притяжение других планет стремится изменить эксцентриситет и, следовательно, оказывает влияние на процесс захвата. Ч. Кансельман учел имеющиеся данные об изменениях эксцентриситета орбиты Меркурия в прошлом и нашел, что вероятность захвата при этом понижается до весьма малой величины, всего лишь около 0,02. Кажется неубедительным, что единственный пример должен соответствовать событию с такой малой вероятностью.

Конечно, прежде всего необходимо критически пересмотреть те допущения, на которых основывалось вычисление вероятности захвата. Серьезные изъяны могут содержаться в двух важных допущениях. Во-первых, величина эксцентриситета орбиты Меркурия была вычислена только на миллион лет назад. Возможно, что на более ранней стадии развития солнечной системы эксцентриситет был больше — условие, которое увеличило бы вероятность захвата. Во-вторых, может быть, Меркурий не является жестким твердым телом, как было предположено при вычислениях. Если

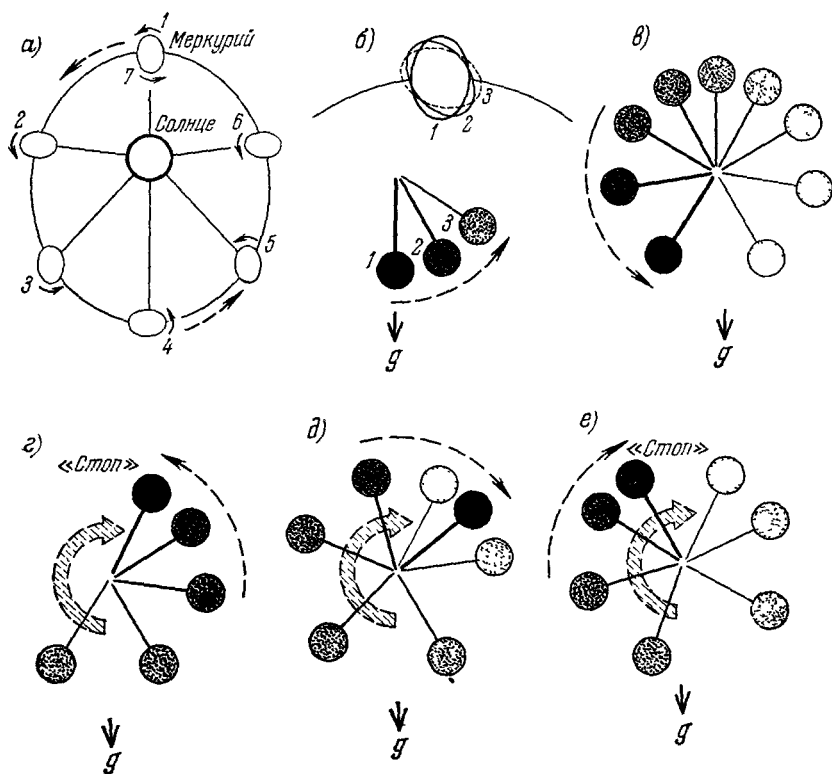


Рис. 7. Захват собственного вращения Меркурия притяжением Солнца можно понять по аналогии с движением маятника. В состоянии орбитально-вращательного резонанса с соотношением периодов $3/2$ Меркурий будет делать полтора оборота вокруг оси в течение каждого обращения по орбите вокруг Солнца (а). Если бы Меркурий вращался несколько быстрее, то ориентация его асимметричной фигуры при последовательных прохождениях через перигелий (наибольших приближениях к Солнцу) изменялась бы подобно изменениям последовательных положений качающегося маятника (б). Придя в положение 3, маятник под влиянием притяжения (g) остановится и начнет двигаться обратно. Аналогично этому ориентация фигуры Меркурия в перигелии начнет изменяться в обратном порядке под действием крутящего момента, оказываемого солнечным притяжением при яйцевидной форме фигуры в экваториальной плоскости Меркурия. Однако вполне вероятно, что когда-то Меркурий вращался значительно быстрее рассмотренного резонансного вращения; при этом его ориентации в перигелии соответствовали положениям вращающегося маятника (в). Скорость вращения Меркурия впоследствии несомненно замедлилась приливным трением подобно тому, как вращающийся маятник (г) замедлится противодействующим моментом (штриховая стрелка) до мгновенной остановки в положении «стоп». Дальнейшая эволюция движения может протекать двумя путями. Если противодействующий момент сохраняет свою величину, то маятник будет непрерывно ускоряться, причем вращение будет происходить в обратном направлении (д); эта возможность соответствует прохождению скорости вращения Меркурия через резонансный барьер. Если же противодействующий момент имеет составляющую, зависящую от скорости, и, следовательно, имеет величину, которая зависит от направления вращения, то маятник (е) может опять остановиться в положении «стоп». В этом случае маятник, совершив определенное число качаний, придет, наконец, в состояние покоя. Эта возможность соответствует захвату Меркурия в орбитально-вращательный резонанс. Исход зависит также от первоначальных условий состояния вращения, которые делают процесс захвата вероятностным событием.

наружная твердая поверхность Меркурия соединена с внутренним ядром вязкой средой, то вносимые силы торможения могли бы значительно повысить вероятность захвата. Обе вероятности в настоящее время исследуются.

Наконец, мы должны принимать во внимание возможность того, что вращение Меркурия в конце концов может и не быть точно резонансным. По радиолокационным измерениям период вращения Меркурия был установлен только приблизительно — равным 59 ± 3 суток. Однако некоторые астрономы, изучая старые зарисовки и фотографии поверхности Меркурия, пришли к выводу, что в пределах 0,01 суток период его вращения соответствует точно резонансному периоду, равному 58,65 суток *). Подтверждение радиолокационных данных оптическими наблюдениями ободряет нас, но прошлый опыт наводит на мысль, что необходимо получить новые доказательства, прежде чем дать окончательное заключение.

Рассказ о Венере не менее интересен. Вследствие плотного облачного покрова поверхность Венеры никогда не была видна с Земли. (Сейчас полагают, что покров вероятнее всего представляет собой не облака, а густой туман, смешанный с дымом и копотью). Поэтому до начала радиолокационных наблюдений определение периода вращения Венеры основывалось на измерениях доплеровских сдвигов линий солнечного спектра, отраженного от планетной атмосферы, и на измерениях движения характерных особенностей в ее атмосфере. При этом даже направление вращения — прямое (в том же направлении, что и орбитальное движение Венеры) или обратное — определить было невозможно. Данные, казалось, больше соответствовали медленному вращению; большинство астрономов полагали, что вращение Венеры прямое и синхронное, подобное принявшемуся тогда вращению Меркурия. Первые радиолокационные наблюдения Венеры в 1961 г. установили только то, что вращение медленное. Позднее более детальный анализ этих данных, выполненный У. Смитом и независимо Р. Карпентером из Лаборатории реактивного движения, навел на мысль, что направление вращения может быть обратным. К тому времени, когда Венера снова приблизилась к Земле (в 1962 г.), чувствительность Голдстоунского радиолокатора была достаточно улучшена, чтобы Р. Карпентер и Р. Голдстейн смогли доказать, что вращение действительно обратное **). На Венере, по крайней мере над ее атмосферой, Солнце восходит на западе и садится на востоке.

Обратное вращение убедительно доказывается, когда экспериментальные данные о полосе доплеровских частот, обусловленных вращением планеты, наносятся в зависимости от дат наблюдений. Кривая, аппроксимирующая ход экспериментальных данных, всегда опускается вблизи нижнего соединения, показывая, что общая угловая скорость вращения Венеры при минимальном расстоянии от Земли до Венеры (в нижнем соединении) имеет наименьшее значение. Составляющая кажущегося общего вращения, вызываемая относительными орбитальными движениями Земли и Венеры, обратно пропорциональна расстоянию между планетами, собственное же вращение не зависит от расстояния. Поэтому вогнутость кривой означает, что два вклада в общую угловую скорость противоположны между собой. Так как вызываемое орбитальными движениями вращение

*) Астрономы вынуждены были наблюдать Меркурий раз в год, когда условия наиболее благоприятны. За год Меркурий совершает около четырех обращений по орбите. Прежде наблюдатели ошибались, считая, что Меркурий за этот промежуток времени делает, четыре, а не шесть, как установлено сейчас, оборотов вокруг оси.

**) Обратное вращение Венеры с периодом около 250 суток было независимо установлено также и по наблюдениям Венеры в СССР в 1962 г. (Прим. перев.)

происходит в прямом направлении (потому что Венера движется вокруг Солнца с большей угловой скоростью, чем Земля), собственное вращение Венеры должно быть обратным.

С 1962 г. период собственного вращения Венеры определялся со все увеличивающейся точностью по данным о доплеровском расширении спектра частот и по слежению за движением различных характерных особенностей на поверхности, которые проявляются на радиолокационной карте. Последние вычисления автора дают период $243,1 \pm 2$ суток. Это значение примечательно тем, что, как отметил Р. Голдстейн в 1962 г., обратное вращение с периодом 243,16 суток означает, что Венера поворачивается к Земле одной и той же стороной в каждом нижнем соединении (при каждом приближении к Земле). Следовательно, экспериментальные результаты наводят на мысль, что вращение Венеры регулируется не Солнцем, а Землей!

Как можно объяснить обратное вращение и регулирование, вызываемое, очевидно, Землей? Можно предположить, что вращение Венеры было всегда обратным, но данные о других планетах указывают на неправдоподобность этого предположения. Первоначальное вращение Венеры было, вероятно, быстрым и прямым. Солнечные приливные силы могли быть достаточно сильными, чтобы замедлить вращение до синхронной величины, но для Венеры такое (синхронное) состояние было бы совсем стабильным, и трудно вообразить какие-нибудь достаточно сильные крутящие моменты, способные нарушить это состояние. Одна довольно фантастическая возможность состоит в том, что Венера когда-то столкнулась с астероидом, имевшим диаметр около 200 км. Такая катастрофа могла бы изменить направление вращения планеты, превратив синхронное вращение в обратное, близкое к современной величине.

Если вращение Венеры каким-либо образом было установлено близким к резонансному с относительными орбитальными движениями Земли и Венеры, то мыслимо, что Земля могла приобрести регулирующее влияние на вращение через гравитационный крутящий момент, оказываемый на возможную постоянную осевую асимметрию в распределении масс на Венере. Однако если предположить (как это сделали Э. Беломо, Ж. Коломбо и автор), что вязкие приливные силы отсутствуют, то вероятность такого явления исчезающе мала. П. Голдрих и С. Пил пошли значительно дальше, предположив, что Венера имеет жидкое ядро, соответствующим образом соединенное с твердым покровом. Они показали, что в этом случае вероятность захвата вращения Венеры движением Земли могла бы увеличиться до довольно высокого уровня: возможно, до величины около 0,1. Несмотря на эти теоретические исследования, наше понимание вращения Венеры все еще далеко не полно. Эти исследования еще не могут помочь в раскрытии эволюции установления существующего вращения, но концентрируют наше внимание на мысли, что из наземных радиолокационных наблюдений можно сделать разумный вывод о жидком ядре Венеры.

Радиолокационные отражения от планеты, как можно ожидать, могут раскрыть свойства ее поверхности, а иногда также и свойства ее атмосферы. Попросту говоря, измеряя коэффициент отражения энергии падающего сигнала (или, точнее, радиолокационное поперечное сечение*), учитывающее размер планеты, шероховатость и отражательную способность поверхности), можно получить приближенную величину диэлектрической посто-

*) Под радиолокационным поперечным сечением планеты понимается поперечное сечение такой идеальной проводящей металлической сферы, которая, если ее поместить на место планеты, будет отражать в обратном направлении к локатору такую же энергию радиолокационного сигнала, как и планета. (Прим. перев.)

янной материала участков поверхности, попадающих в центр видимого диска планеты, и, тем самым, сделать заключения в отношении состава поверхности. Средние величины радиолокационных поперечных сечений для Марса, Меркурия и Луны примерно одинаковы (около 7% геометрического поперечного сечения) и, по-видимому, мало зависят от частоты радиолокационного сигнала. Однако локальные коэффициенты отражений отдельных участков поверхности существенно отличаются между собой. Изменение локальных коэффициентов по поверхности, по-видимому, наиболее заметно проявляется для Марса. Например, на частоте 430 Мгц (в Аресибо) наблюдалось, что вдоль 22-й параллели с. ш. Марса диэлектрическая постоянная изменялась от 2 до 4,5. Эти величины показывают, что материал поверхности Марса сильно похож на некоторые горные породы и почву Земли, и исключают возможность заметного распространения воды. Величина радиолокационного поперечного сечения для Венеры обычно больше (15 — 16%) и мало изменяется при повороте планеты, но заметно зависит от частоты: было обнаружено, что поперечное сечение резко падает на высоких частотах (в сантиметровом диапазоне) — изменение, которое в основном приписывается поглощению коротких радиоволн в атмосфере Венеры. Диэлектрическая постоянная, определенная на более длинных волнах еще в 1961 г., для Венеры равна 4,5. Эта величина несовместима с предположением о наличии на Венере больших пространств воды, что было подтверждено более поздними экспериментальными данными, полученными с помощью радиоастрономических наблюдений с Земли и космических кораблей.

Топографию планеты (профиль поверхности) можно изучать, осуществляя непрерывное слежение за изменением запаздывания эхо-сигнала от ближайшей точки (центра видимого диска). Запись колебаний запаздывания относительно плавного среднего изменения, обусловленного движением планеты, дает колебание высоты поверхности, попадающей в центр видимого диска по мере вращения планеты. Для быстро вращающейся планеты, например для Марса, изменения запаздывания, вызываемые изменением профиля, легко могут быть отделены от изменений, вызываемых относительными орбитальными движениями планеты и Земли, поскольку периодичности этих влияний отличаются между собой в сотни раз (как один день по сравнению с двумя годами). Измерения профиля поверхности Марса вдоль его 21-й параллели с. ш., выполненные Г. Петтенгилом в 1967 г. в Хайстеке, показали изменение высоты примерно на 12 км (рис. 8). Наиболее поразительным в профиле является некоторый регулярный волнообразный характер его колебаний. Неожиданным открытием явилось отсутствие сколько-нибудь значительной корреляции между профилем и распределениями оптической или радиолокационной яркостей. Определение соответствующих изменений высот на Меркурии и Венере в значительной степени усложнено тем, что периоды их вращения и орбитального движения мало отличаются между собой, что препятствует разделению топографических и орбитальных влияний. Тем не менее разделение возможно. Предварительные исследования показывают, что изменения высот на этих планетах выражены значительно слабее, чем на Марсе.

Применяя метод разделения эхо-сигналов по запаздыванию и доплеровскому сдвигу частоты, в принципе можно построить радиолокационное изображение планеты в виде распределения энергии сигналов, отраженных от отдельных элементов поверхности (или, точнее, от отдельных «разрешаемых ячеек по запаздыванию и частоте»). Такое радиолокационное изображение поверхности, представляющее собой распределение энергии как функцию запаздывания и частоты, является аналогом оптической

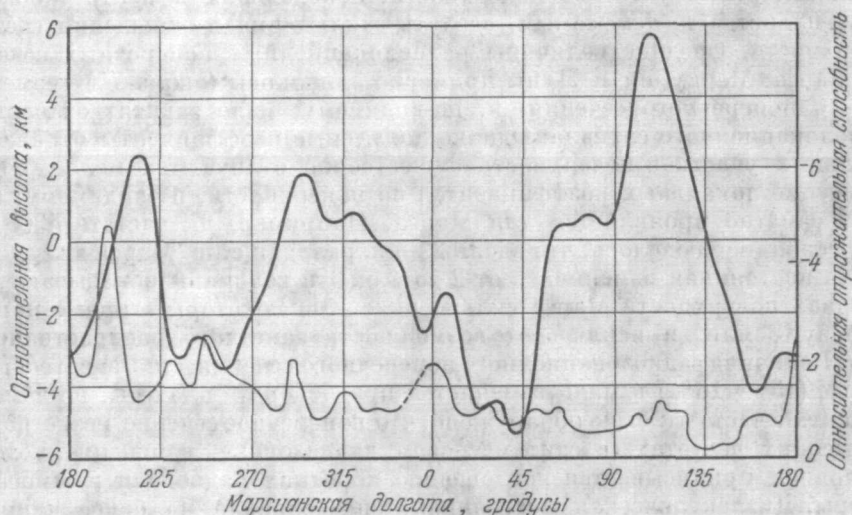


Рис. 8. Профиль и отражательная способность поверхности Марса вдоль 21-й параллели с. ш. основаны на измерениях, проводившихся по мере того, как планета, вращаясь вокруг оси, поворачивалась к Земле разными участками поверхности, лежащими на 21-й параллели. По-видимому, измерения высоты (толстая линия) и отражательной способности (тонкая линия) мало коррелированы между собой. Некоторая часть показанной здесь тонкой структуры, вероятно, может быть приписана ошибкам измерений и, возможно, не имеет существенного значения.

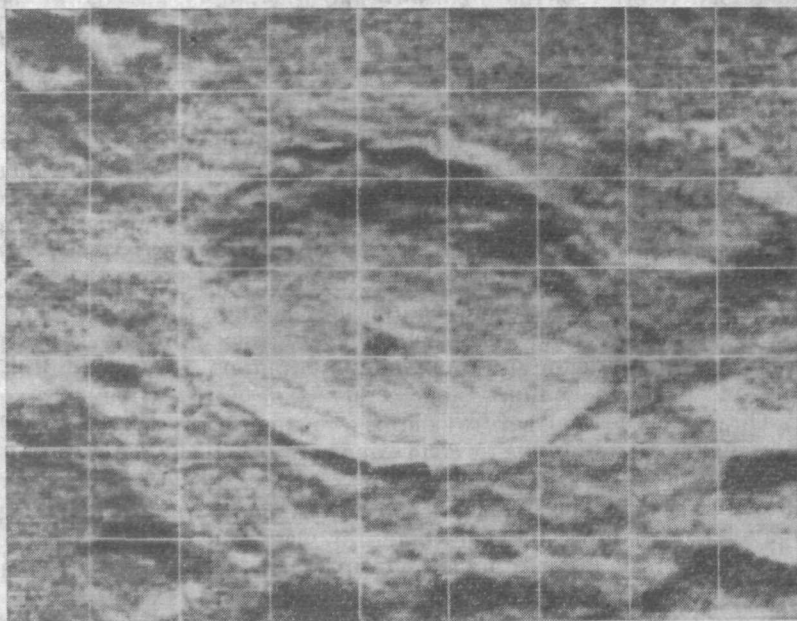


Рис. 9. Радиолокационное изображение Луны, полученное Г. Петтенгидом и др. с помощью радиолокатора Линкольнской лаборатории, по достигнутому разрешению (один-два километра) сравнимо с наземными оптическими фотографиями Луны. Здесь в центре изображения показан кратер Тихо в южной полусфере Луны.

фотографии, которая по существу представляет собой распределение интенсивности отраженного света как функцию широты и долготы. Главная трудность составления радиолокационного изображения практически одна: недостаточная мощность сигнала требует накапливать энергию с относительно большой площади, делая сравнительно крупными разрешаемые ячейки и жертвуя высокой разрешающей способностью метода.

В настоящее время пока только радиолокационные изображения Луны могут быть получены с высоким качеством (рис. 9). Они сравнимы с лучшими оптическими фотографиями, выполняемыми с Земли, но, естественно, значительно хуже фотографий, полученных с лунных кораблей

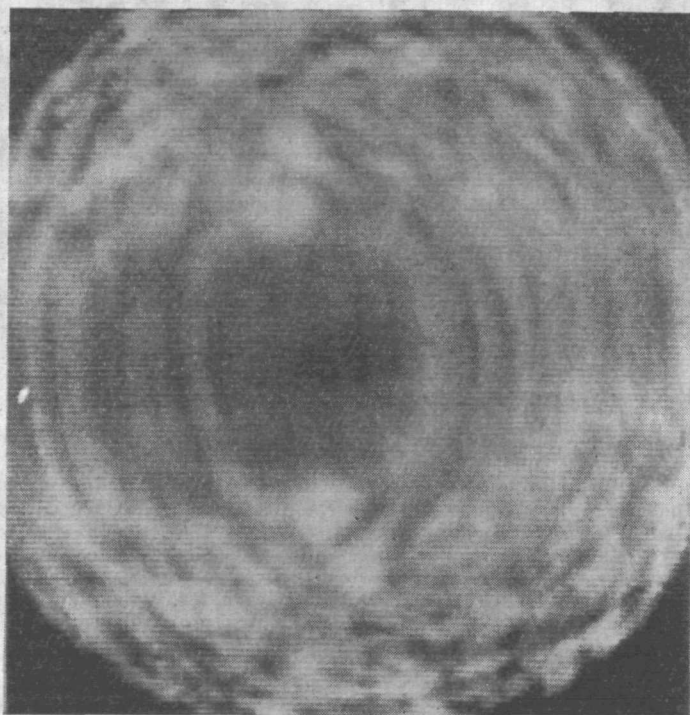


Рис. 10. Радиолокационное изображение Венеры составлено сотрудником Корнелльского университета Р. Юргенсом на основе измерений, выполненных с помощью 300-м радиотелескопа в Аресибо (Пуэрто-Рико). При радиолокационной съемке энергия эхо-сигнала от данной области поверхности определяется как функция времени приема эхо-сигнала и доплеровского сдвига его частоты относительно частоты излученного сигнала. Двукратная неоднозначность при нанесении на изображение каждой точки (см. текст) придает планете симметричный вид. Первичные данные из которых было получено это изображение, показаны на рис. 11.

«Орбитер» или «Сервейер». Конечно, наиболее ценными были бы радиолокационные изображения поверхности планет, которые не так легко доступны для оптических наблюдений, как Луна. Сравнительно грубое (с разрешением 100—200 км) радиолокационное изображение Венеры было недавно составлено Т. Хэгфорсом и А. Роджерсом в Хайстеке и Р. Юргенсом в Аресибо (рис. 10 и 11). Эхо-сигналы от Меркурия довольно слабы

для снятия радиолокационной карты, но имеются некоторые основания для предположения, что эта планета, как может оказаться, имеет необычные характеристики поверхности. Чтобы осуществить задачи картографирования большей части поверхности Венеры и Меркурия с приемлемым разрешением, требуются лучшие радиолокационные системы.

Другой подход к получению изображения планетной поверхности на радиоволнах состоит в том, чтобы использовать две станции, одна из которых (большая) располагается на Земле, а другая — на космическом корабле, движущемся по орбите вокруг исследуемой планеты.

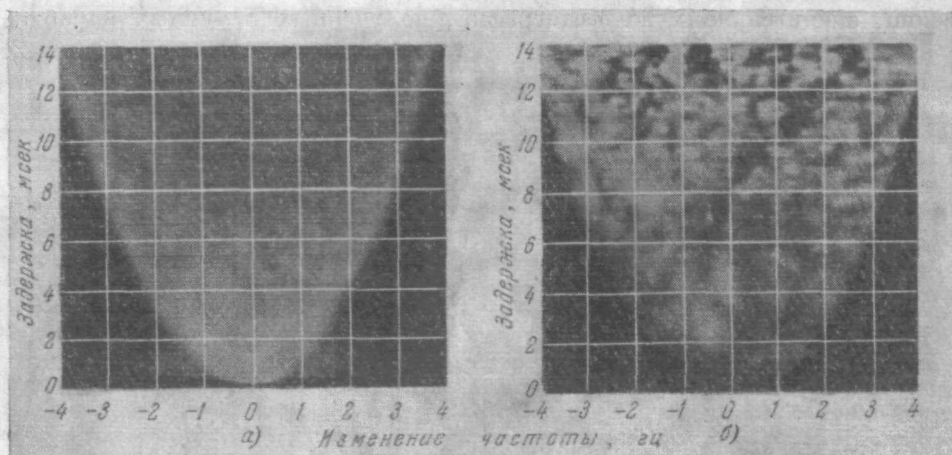


Рис. 11. Составление радиолокационного изображения Венеры, показанного на рис. 10, началось 6 августа 1967 г. со съемки радиолокационной карты (а), на которой яркость пропорциональна логарифму энергии, принятой при данных значениях запаздывания и доплеровской частоты сигнала. Очень яркая область соответствует центру видимого диска планеты. Яркость этой области уменьшается, и выявляются особенности поверхности, когда вычитается теоретическая яркость соответствующей модели изотропной сферической поверхности. При этом остается изображение только аномально отражающих областей (б). Чтобы составить окончательное изображение (см. рис. 10), эта информация затем наносится в обычной системе координат. Изображенная карта охватывает область Венеры около 100 градусов телесного угла.

Используя одну из них в качестве передатчика, излучающего радиоволны к планете, а другую — в качестве приемника, который может принимать как прямые, так и отраженные планетой радиоволны, можно построить голограмму поверхности. Попытка применения этого метода для получения изображения Луны, используя лунный орбитер, недавно была принята Г. Тайлером, Р. Эшлеманом и другими сотрудниками Стэнфордского университета. Результаты обнадеживающие, но чтобы завершить анализ, необходимо выполнить еще большую работу.

Довольно неожиданно радиолокационные наблюдения, выполненные с Земли, сыграли решающую роль в определении температуры и давления на поверхности Венеры. В октябре 1967 г. межпланетный корабль «Венера-4» совершил посадку на Венеру, во время которой передал информацию о составе, температуре и давлении ее атмосферы на разных высотах над поверхностью. Переданные данные показывали, что температура на самой поверхности около 550°K (280°C) и давление приблизительно 20 атм . При этом значения температуры и давления были привязаны к высоте над поверхностью на основании только единственного радиоло-

кационного измерения высоты, произведенного «Венерой-4». На следующий день вблизи Венеры прошел «Маринер-5». В момент захода корабля за планету и в момент его выхода радиолуч пересекал атмосферу Венеры. Из анализа измерений доплеровского сдвига частоты сигналов, излучавшихся «Маринером-5», можно было вывести температуру в верхних слоях атмосферы Венеры как функцию расстояния до центра Венеры от траектории луча, распространяющегося с «Маринера-5» к Земле. Объединение измерений обоих межпланетных кораблей приводило к определению радиуса Венеры. Однако при этом возникла трудность: радиус Венеры, выведенный из этих данных, оказался на 25 км больше радиуса, полученного из анализа радиолокационных измерений запаздывания сигнала от Венеры, выполненных с 1961 по 1966 г. В 1968 г. вновь было выполнено несколько независимых исследований радиолокационных данных, накопленных в последние годы в Аресибо, Голдстоуне и Хайстеке. Все эти исследования подтвердили прежнее радиолокационное значение радиуса.

Полагая, что измерения «Маринера-5» и радиолокационное значение радиуса правильны, можно путем экстраполяции найти, что температура поверхности Венеры должна составлять около 700°K и давление на поверхности около 100 атм *). Эти значения температуры и давления в сочетании с данными о составе атмосферы, измеренными «Венерой-4», хорошо согласуются с другими экспериментальными результатами наземных наблюдений. В частности, резкое уменьшение радиолокационного сечения Венеры, наблюдаемое с увеличением частоты в сантиметровом диапазоне, в этом случае легко объясняется поглощением радиоволн в атмосфере Венеры. Объясняется также частотная зависимость радиояркостной температуры Венеры, измеренной с помощью наземных радиоастрономических средств. Характеристики же приповерхностного слоя атмосферы Венеры, выведенные из измерений «Венеры-4» в отдельности, не могут объяснить ни то, ни другое без довольно произвольных допущений. Почти вынужденно напрашивается вывод, что измерение высоты на корабле «Венера-4» было неточным и что корабль прекратил передачу устойчивого потока замечательных данных на высоте около 25 км над поверхностью. Таким образом, определение радиуса Венеры из радиолокационных данных, имевшее на первый взгляд только познавательное значение, будет играть центральную роль в проведении будущих межпланетных исследований нижнего слоя атмосферы и поверхности сестры нашей планеты.

Последним достижением радиолокационной астрономии был первый прямой радиолокационный контакт с малой планетой Икар, осуществленный в Хайстеке и Голдстоуне в середине июня 1968 г. в период наибольшего приближения Икара к Земле.

Что можно сказать о будущем радиолокационной астрономии? Прошлый рост радиолокационных возможностей может быть охарактеризован как «взрывной». Общая чувствительность радиолокационных систем после второй мировой войны повышалась колоссальными темпами — в среднем почти в четыре раза за каждый год. Хотя постоянно поддерживать такой темп роста в будущем может оказаться затруднительным, тем не менее, используя только имеющуюся технологию, темп можно было бы легко поддержать по крайней мере на ближайшее десятилетие; при этом расходы составили бы незначительную часть общего национального

*) Глубинное зондирование атмосферы Венеры, выполненное 16 и 17 мая 1969 г. советскими автоматическими станциями «Венера-5» и «Венера-6», показало, что атмосферное давление на поверхности Венеры может составлять $60\text{--}140\text{ атм}$, температура $670\text{--}800^{\circ}\text{K}$ («Правда» от 4 июня 1969 г.). (Прим. перев.)

дохода. В настоящее время уже спроектирован радиолокационный телескоп, который будет почти в 1000 раз чувствительнее, чем телескоп в Хайстеке. Сметная стоимость нового телескопа меньше, чем стоимость одного корабля «Маринер». Чувствительность нового телескопа была бы достаточна, чтобы поставить под радиолокационный надзор много других объектов солнечной системы, таких как галилеевские спутники Юпитера и две крошечные луны Марса. Солнечная система изобилует тайнами. Новые экспериментальные сведения, по-видимому, раскрывают меньше тайн, чем создают вновь. Можно не опасаться, что будущие радиолокационные наблюдения изменят эту тенденцию.

Массачусетский технологический институт,
США

ЛИТЕРАТУРА

1. Irwin I. Shapiro, Gordon H. Pettengill, Michael E. Ash, Melvin L. Stone, William B. Smith, Richard P. Ingalls, Richard A. Brockelman, *Phys. Rev. Lett.* **20** (22), 1265 (1968).
 2. *Radar Astronomy* (John V. Evans and Tor Hagfors, Eds.), McGraw-Hill Book Company, 1968.
 3. Gordon H. Pettengill, Irwin I. Shapiro, *Ann. Rev. Astron. and Astrophys.* **3** (1965).
 4. Peter Goldreich, Stanton Peale, *Astron. J.* **72** (No. 1350), 662 (1967).
 5. F. Bellomo, G. Colombo, I. I. Shapiro, в сб. *Mantles of the Earth and Terrestrial Planets* (S. K. Runcorn, Ed.), Interscience Publishers, 1967.
-