

**РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ МАРСА,
ВЕНЕРЫ И МЕРКУРИЯ НА ВОЛНЕ 39 см
В 1980 г.**

*Ю. Н. Александров, А. С. Вышлов, В. М. Дубровин, А. Л. Зайцев,
С. П. Игнатов, В. И. Каевицер, академик В. А. Котельников, А. А. Крымов,
Г. М. Петров, О. Н. Ржига, А. Т. Тагаевский, А. Ф. Хасянов, А. М. Шаховской*

Доклады Академии наук СССР. 1980. Том 255. № 6

В период с февраля по апрель 1980 г. в Центре дальней космической связи в Крыму Институтом радиотехники и электроники АН СССР совместно с рядом организаций были проведены радиолокационные наблюдения Марса, Венеры и Меркурия. При этих наблюдениях для излучения и приема радиосигналов использовалась новая полноповоротная параболическая антенна с диаметром зеркала 70 м. Применение высокоэффективной антенны, а также повышение мощности передатчика и улучшение чувствительности приемника позволили в 50 раз повысить энергетический потенциал планетного радиолокатора (при сохранении прежней длины волны 39 см), что существенно расширило возможности радиолокационных исследований планет. В частности, предельные дальности радиолокации увеличились более чем в 2,5 раза.

Наблюдениями в 1980 г. были охвачены значительные участки орбит планет: 82° для Венеры вблизи элонгации, 139° для Меркурия в районе нижнего соединения и 29° для Марса в районе его противостояния; при этом наибольшие расстояния до Венеры, Меркурия и Марса соответственно составляли 161, 139 и 135 млн км (эти расстояния не являются предельными). В результате наблюдений была получена высокоточная астрометрическая информация, позволившая выяснить фактическую точность теорий движения внутренних планет. Были получены также новые сведения о рельефе и отражательных свойствах их поверхности.

Расстояния и скорости планет измерялись по методике, изложенной в работах [1, 2].

Отклонения расчетных расстояний до Венеры, прогнозируемых на основе численной теории [3], от их измеренных значений на всем интервале наблюдений 1980 г. не превышали 6 км (как и в наблюдениях 1977 и 1978 гг.). При этом среднеквадратичные значения аппаратурно-методических ошибок измерений составляли 300–500 м

на дальностях до 140 млн км и 1–1,5 км на больших дальностях. График измеренных отклонений в зависимости от долготы подлокаторной точки в системе координат, принятой МАС в 1976 г., показан в верхней части рис. 1. Через полученные точки была проведена прямая линия, аппроксимирующая регулярную составляющую отклонений, обусловленную неточностью прогноза. При этом были исключены 3 точки на долготах 87, 193 и 201°, относящиеся согласно работе [4] к горным областям.

Вариации отклонений относительно аппроксимирующей линии, показанные отдельно в нижней части рис. 1, можно рассматривать как профиль высот поверхности Венеры вдоль трассы движения подлокаторной точки, широта которой изменялась от 1°,0 ю.ш. на долготу 70° до 3,7° ю.ш. на долготу 230°. Как видно из рис. 1, трасса пересекает холмистую равнину протяженностью около 8 тыс. км в интервале долгот 110–185° и две обширные горные области протяженностями около 4 тыс. км и 2,5 тыс. км в интервалах долгот 70–110° и 135–210° соответственно. Первая из них имеет наибольшую высоту около 4 км на долготу 90°, высота второй области достигает 2,5 км на долготу 195°.

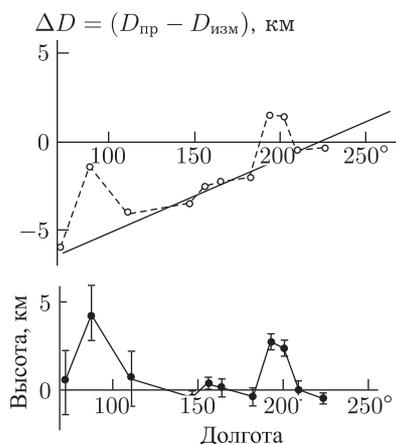


Рис. 1. Отклонения рассчитанных на основе [3] расстояния до Венеры от их измеренных значений (сверху) в записи мости от долготы в системе координат, принятой МАС в 1976 г. Трасса подлокаторной точки проходит от 1° ю.ш. (слева) до 3,7° ю.ш. (справа). Внизу приведен профиль высот поверхности Венеры, полученный по этим измерениям. Вертикальными отрезками показаны среднеквадратичные ошибки измерений

Профиль высот поверхности Венеры в интервале долгот 145–230° (см. рис. 2) более детально исследовался также другим способом [2], основанным на одновременном измерении расстояний до разных точек видимого экватора планеты, эхо-сигналы от которых при обработке

разделялись по запаздыванию и доплеровскому смещению частоты. Разрешение поверхности в этом случае составляло около $0,4^\circ$ по долготе или 40 км вдоль видимого экватора, что позволило, как видно из рис. 2, получить более подробную структуру профиля в окрестностях 8 точек, указанных на рис. 1, и выделить некоторые детали рельефа меньшего размера. Измерения, относящиеся к разным дням наблюдений, соединены на рис. 2 штриховой линией.

Прогнозирование расстояний до Марса в наблюдениях 1980 г. производилось на основе численной теории [5]. Отклонения измеренных расстояний от их прогнозируемых значений за время наблюдений изменялись в пределах 3–21 км и в значительной степени были обусловлены влиянием рельефа поверхности; при этом среднеквадратичные ошибки измерений составляли 0,6–1,5 км в зависимости от дальности до планеты. Анализ отклонений показал, что регулярная составляющая, обусловленная неточностью прогноза, за время наблюдений монотонно изменялась от 13,5 до 21 км. Такое согласование можно считать вполне удовлетворительным, если учесть, что фактический интервал прогноза был равен 9 годам, поскольку последняя радиолокационная информация, использовавшаяся при построении численной теории [5], относится к 1971 г. Изменение ошибки прогноза за время ночного цикла наблюдений (менее 8 ч) не превышало в основном 100 м, что значительно меньше ошибок измерений. Поэтому принималось, что вариации отклонений измеренных расстояний от прогноза в течение каждого отдельного цикла обусловлены лишь вариациями высот участков поверхности, проходящих через подлокаторную точку по мере вращения Марса. Протяженности трасс, вдоль которых за 8 ч перемещалась подлокаторная точка, составляли в среднем 117° по долготе. Поскольку Марс и Земля имеют разные (по величине и направлению) векторы скоростей собственного вращения и обращения по орбитам, то трассы с течением времени смещались как по долготе, так и по широте. В интервале наблюдений это смещение за одни сутки составляло $8^\circ 5' - 9^\circ$ по долготе и $1', 5' - 3'$ по широте, при этом изменение широты за 8 ч не превышало $1'$. Широты трасс с 15 февраля по 15 апреля изменялись в пределах от $20^\circ 01'$ до $21^\circ 12'$.

Профили высот поверхности вдоль отдельных трасс обрабатывались методом наименьших квадратов в перекрывающихся участках, чтобы получить общий профиль высот поверхности Марса в полном интервале долгот $0 - 360^\circ$.

Вид полученного профиля приведен на рис. 3. Для привязки полученного профиля к среднему (нулевому) уровню поверхности использовалась топографическая карта Марса, составленная на основе телевизионных снимков, переданных с комического аппарата «Маринер-9» [6]. Привязка производилась по ровным участкам в интервалах долгот $160 - 190^\circ$ и $230 - 260^\circ$, лежащим на поверхности эллипсоида с осями $A = 3394,6$ км, $B = 3393,3$ км, $C = 3376,3$ км.

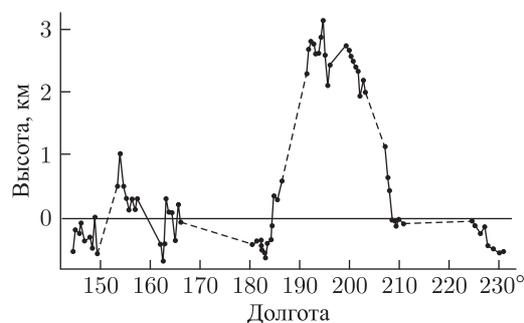


Рис. 2. Профиль высот поверхности Венеры, полученный по одновременным измерениям расстояния до разных точек видимого экватора на основе частотно-временной селекции эхо-сигналов. Разрешение по долготе $0^{\circ}4$ или 40 км вдоль экватора

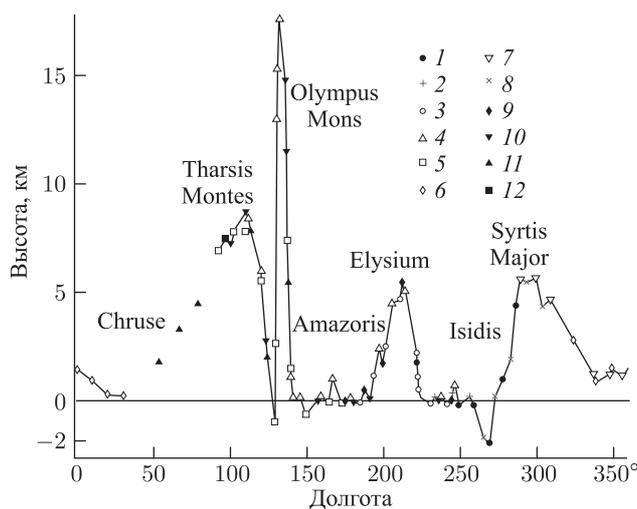


Рис. 3. Профиль высот поверхности Марса вдоль $20^{\circ}44' \pm 20'$ с.ш. Разрешение составляло около 3° по широте и 4° по долготе. Область в интервале $120-150^{\circ}$ анализировалась с разрешением по долготе около $1^{\circ}5$ (90 км). Малое число измерений в интервале $32-95^{\circ}$ не позволило получить в этой области непрерывный профиль высот. Точность измерения высот в зависимости от уровня сигналов изменялась от 0,6 до 1,5 км. Измерения в разные дни наблюдений: 1 — 15–16 II, 2 — 19–20 II, 3 — 21–22 II, 4 — 26–27 II, 5 — 28–29 II, 6 — 18–19 III, 7 — 21–22 III, 8 — 25–26 III, 9 — 2–3 IV, 10 — 8–9 IV, 11 — 11–12 IV, 12 — 15 IV 1980

Наиболее примечательным является участок профиля, полученный при прохождении подлокаторной точки по северному склону горы Olympus Mons, где наблюдается максимальная на широте $20^{\circ}44' \pm 20'$

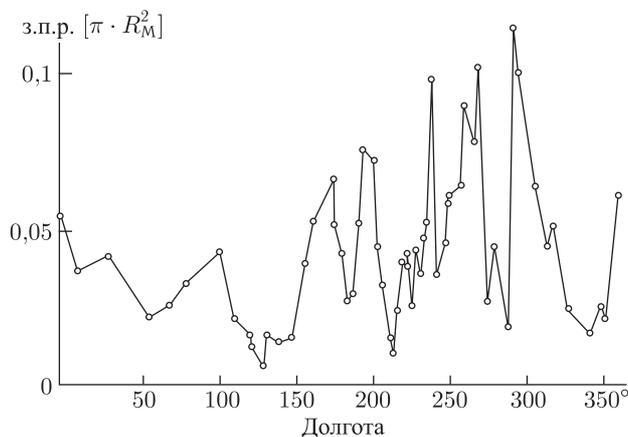


Рис. 4. Вариации э.п.р. Марса в единицах поперечного сечения πR_M^2 вдоль $20^\circ 44' \pm 20'$ с.ш. Ошибки измерений не превышали 30%

высота $17,6 \pm 1,5$ км. Средняя крутизна склонов горы, оцененная из отношения высоты к полуширине подножья на нулевом уровне, составляет $3,6$. Эта гора, как и сравнительно глубокая впадина слева от нее на долготе 130° , а также более протяженная впадина глубиной 2 км на долготе 270° , не были ранее зафиксированы на графике профиля Марса, полученном американскими исследователями в 1967 г. [7] в том же интервале широт. Измеренные впадины не наблюдаются и на указанной выше топографической карте Марса.

При радиолокации Марса в 1980 г. были проведены также измерения отражательных свойств его поверхности. Вариации эффективной площади рассеяния (э.п.р.), отнесенной к площади поперечного сечения планеты πR_M^2 в зависимости от долготы подлокаторной точки представлены на рис. 4. Поскольку в этих измерениях учитывались лишь сигналы, отраженные частью планеты, представляющей поверхность шарового сегмента с диаметром 730 км (высота сегмента ~ 20 км), полученные данные соответствуют нижней границе э.п.р. планеты.

Как видно из рис. 4, э.п.р. Марса изменяется более чем на порядок — от 0,01 до 0,12. Аномально низкие значения э.п.р. в районе горных образований Olympus Mons и Elysium могут быть связаны с особой структурой поверхности в этих районах, которая приводит к уменьшению площади участков, ориентированных перпендикулярно лучу радиолокатора. Наиболее высокое значение э.п.р. приходится на плоскогорье, расположенное в области Syrtis Major, где наблюдается сильное зеркальное отражение от крупномасштабных гладких областей.

Первые радиолокационные наблюдения Меркурия осуществлены в СССР летом 1962 г. [8]. Тогда были проведены исследования отражательных свойств его поверхности и измерения скорости движения.

Чувствительность прежнего планетного радиолокатора была недостаточна для проведения точных измерений расстояния до Меркурия, поэтому попыток его радиолокации в последующие годы в СССР не предпринималось.

В наблюдениях Меркурия в 1980 г. (с 1 марта по 5 апреля) расстояние до него измерялось с точностью 1,2 км, скорость его движения — с точностью 5 см/с. При этом расстояние до Меркурия составляло 97–139 млн км, а скорость его движения относительно Земли изменялась от $-27,3$ до $+26,3$ км/с. Измеренные расстояния в интервале наблюдений оказались на 120–420 км больше вычисленных по аналитической теории [9], построенной на основе оптических наблюдений. Как и следовало ожидать, точность классической аналитической теории движения Меркурия оказалась на полтора-два порядка хуже точности численных теорий [3, 5] по Венере и Марсу.

Авторы выражают благодарность Р. А. Андрееву, С. М. Барабошкину, В. П. Давыдову, О. Н. Дорощуку, В. П. Конофалову, А. Г. Мелихову, А. С. Набатову, В. М. Подолянюку, Л. Ф. Соловьевой, Ю. В. Филину, О. С. Шампаровой, С. А. Щетинникову, В. Н. Юрченко и другим участникам работ по радиолокации планет.

Институт радиотехники и электроники
Академии наук СССР, Москва

Поступило 4 IX 1980

Литература

1. В. А. Котельников и др., *Астрон. журн.*, т. 57, 3 (1980).
2. Ю. Н. Александров и др., там же, т. 57, 237 (1980).
3. М. Д. Кислик и др., *ДАН*, т. 241, 1046 (1978).
4. D. B. Campbell et al., *Science*, v. 175, 514 (1972).
5. М. Д. Кислик и др., *ДАН*, т. 249, 78 (1979).
6. *Atlas of Mars (M25 M3 RMS)*, U.S. Geological Survey, 1967.
7. G. H. Pettengill et al., *Astron. J.*, v. 74, 461 (1969).
8. В. А. Котельников и др., *ДАН*, т. 147, 1320 (1962).
9. *Астрономический ежегодник СССР с приложением*, 1980.