

**РЕЗУЛЬТАТЫ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ  
НАБЛЮДЕНИЙ ВЕНЕРЫ НА ВОЛНЕ 39 см  
В 1980 г.**

*В. А. Котельников, Ю. Н. Александров, Р. А. Андреев, А. С. Вышков,  
В. М. Дубровин, В. А. Гришмановский, А. Л. Зайцев, В. И. Каевитсер,  
А. А. Крымов, Г. М. Петров, О. Н. Ржига, А. Ф. Хасянов, А. М. Шаховской*

Астрономический журнал. 1982. Том 59. Вып. 4

В период с 15 февраля по 15 апреля 1980 г. с помощью новой полноповоротной параболической антенны диаметром 70 м выполнены радиолокационные наблюдения Венеры в интервале дальностей от 161 до 94 млн км. Проведены измерения расстояния до планеты, скорости ее движения, а также профили высот поверхности в интервале долгот  $70^{\circ}$ – $230^{\circ}$ ; широта подлокаторной точки при этом изменялась от  $1^{\circ}$  до  $3,7^{\circ}$  ю.ш. Отклонение измеренного расстояния от прогноза, вычисленного на основе новой численной теории движения планет, не превышает 6 км при среднеквадратичном значении ошибок измерений 0,3–1,5 км. В исследованной части поверхности Венеры наблюдаются две горные области, разделенные протяженной холмистой равниной. Первая из горных областей достигает высоты 4,5 км вблизи долготы  $90^{\circ}$ , вторая — 2,5 км на долготе  $195^{\circ}$ . Протяженность этих областей составляет примерно 4 тыс. км и 2,5 тыс. км соответственно.

Results of radar observations of Venus at 39 cm wave in 1980, by V. A. Kotelnikov, Yu. N. Alexandrov, R. A. Andreev, A. S. Vyshov, V. M. Dubrovin, V. A. Grishmanovsky, A. L. Zaitsev, V. I. Kaevitser, A. A. Krymov, G. M. Petrov, O. N. Rzhiga, A. F. Hasyanov, A. M. Shahovskoj. — Over the period from February 15 to April 15, 1980 radar observations of Venus were carried out with a new fully steerable parabolic antenna of  $\varnothing 70$  m in the range of 161–94 million km. Distances from the planet, its motion velocities, surface altitude profiles in the longitude range of  $70^{\circ}$ – $230^{\circ}$  were measured. The latitude of a subradar point changed therewith from  $1^{\circ}$  to  $3.7^{\circ}$  SL. The deviation of the measured distance from the predicted one, calculated on the basis of a new numerical theory of planet motion, did not exceed 6 km for rms values of measurement errors of 0,3–1,5 km. Two mountain areas devided by an extensive hilly plain were observed in the investigated Venussian region. One of them reached the hight of 4,5 km, whereas the other reached 2,5 km at the longitude of  $195^{\circ}$ . There areas lengthed about 4000 km and 2500 km correspondingly.

## Введение

Весной 1980 г. в Крыму Институтом радиотехники и электроники АН СССР совместно с рядом организаций был проведен очередной цикл радиолокационных наблюдений Венеры [1]. Для излучения и приема радиосигналов использовалась новая полноповоротная параболическая антенна с диаметром зеркала 70 м. Благодаря применению высокоэффективной антенны, повышению мощности передатчика и улучшению чувствительности приемника энергетический потенциал планетного радиолокатора при сохранении прежней длины волны увеличен в 50 раз, что позволяет сейчас проводить радиолокацию Венеры на всей ее орбите, включая максимальное удаление 240 млн км. В 1980 г. наблюдениями было охвачено 82° дуги ее орбиты в окрестностях наибольшей элонгации, расстояние в период наблюдений изменялось от 161 до 94 млн км (Венера приближалась к Земле).

В данной статье приводятся результаты измерений расстояний, скорости и профиля высот поверхности планеты.

## Измерения расстояния и скорости Венеры

Расстояние и скорость движения Венеры относительно радиолокатора определялись по измерениям времени распространения (запаздывания) и доплеровской поправки для эхо-сигнала от ближайших к Земле участков ее поверхности (от подлокаторной точки). Доплеровская поправка вводится в частоту излучаемого сигнала  $f_0$  для компенсации доплеровского смещения частоты эхо-сигнала. Ее величина определяется таким образом, чтобы частота эхо-сигнала от подлокаторной точки была равна номинальному значению  $f_0$  [2].

В качестве эталона времени и частоты при измерениях использовался водородный стандарт, значение частоты эталонного сигнала которого известно с точностью лучше чем  $10^{-12}$ . Из него путем преобразования частоты (умножения, деления, смешивания) формировались сигналы всех систем планетного радиолокатора-передатчика, гетеродинов приемника, программно-временного устройства и системы обработки эхо-сигналов. При этом достигались высокая точность знания номиналов и стабильность всех частот, что обеспечивало высокую точность частотно-временных измерений.

Априорное знание орбит Венеры и Земли дает возможность рассчитать прогнозируемые значения запаздывания и доплеровской поправки заранее, поэтому процесс измерений включал два этапа: сначала при излучении зондирующего сигнала аппаратно воспроизводились (отсчитывались) их прогнозируемые значения, а затем при обработке принятых эхо-сигналов определялись отклонения от прогноза. Прогнозирование осуществлялось на основе численной теории движения Венеры и Земли, построенной в работе [3]. Как выяснилось, ошибки прогноза на интервале наблюдений 1980 г. не превышали 6 км по даль-

ности и 3 см/с по скорости. Аппаратурное прогнозирование позволило в значительной мере реализовать высокую точность измерительного эталона и резко сократить диапазон неопределенности при обработке эхо-сигналов.

Временной ход прогнозируемой доплеровской поправки на интервале каждого сеанса наблюдений аппроксимировался полиномом третьей степени и воспроизводился по программе с точностью 0,01 Гц с помощью специализированного цифрового синтезатора программно-изменяемых частот [4], синтез которых производился из частоты эталонного колебания.

Для измерения запаздывания и частоты в качестве зондирующего сигнала применялся непрерывный радиолокационный сигнал с периодической линейной (пилообразной) частотной модуляцией (ЛЧМ-сигнал), который формировался из эталонного колебания методом прямого цифрового синтеза [5]. Девиация частоты  $F_m$  и период модуляции  $T_m$  выбирались в следующих комбинациях: 1)  $F_m = 128$  кГц,  $T_m = 0,5$  с — при дальностях до Венеры меньше 140 млн км; 2)  $F_m = 32$  кГц,  $T_m = 0,25$  с — при больших дальностях. Разрешающая способность по дальности, определяемая девиацией частоты, при этом составляла соответственно 1,2 и 4,8 км.

Начало модуляции и программного изменения доплеровской поправки при излучении сигнала привязывалось к началу целой минуты Всемирного координированного времени UTC.

Длительности режимов излучения и приема были равны прогнозированному запаздыванию. В режиме приема ЛЧМ-сигнал использовался в качестве гетеродинного колебания приемника для демодуляции принимаемых эхо-сигналов, поэтому он синтезировался вторично с задержкой на прогнозируемое время запаздывания эхо-сигнала от подлокаторной точки, которое отсчитывалось специализированным программно-временным устройством [6] с дискретностью 0,1 мкс путем счета числа периодов эталонного сигнала с частотой 10 МГц.

Изменение запаздывания за время сеанса наблюдения компенсировалось путем ввода соответствующей программно-изменяемой доплеровской поправки в частоту эталонного колебания, из которого синтезировался излучаемый ЛЧМ-сигнал. В этом случае его период модуляции и девиация частоты изменялись таким образом, чтобы их значения для эхо-сигнала от подлокаторной точки были равны номинальным на протяжении всего режима приема, что позволяло осуществлять накопление и усреднение эхо-сигнала, как от неподвижной цели.

Измерения доплеровской поправки производились как при излучении ЛЧМ-сигнала, так и при излучении немодулированного зондирующего сигнала.

Принятые сигналы обрабатывались на ЭВМ. При этом сначала методом быстрого преобразования Фурье производился спектральный анализ с разрешением 0,122 Гц и синтезировалось двумерное распре-

Таблица 1. Запаздывание сигнала при радиолокации Венеры в 1980 г.

Дата 1980 г.	Время излучения, час. мин	Измеренное запаздывание, мкс	Среднеквадратичная ошибка, мкс
15.II	17 00	1 073 651 774	8
21.II	16 28	1 033 520 113	7
1.III	08 26	973 423 380	6
15.III	08 44	872 010 823	2
15.III	09 18	871 832 445	2
18.III	16 58	847 100 700	3
18.III	17 32	846 036 037	3
18.III	18 30	846 642 380	3
21.III	18 24	824 098 507	3
29.III	13 44	764 400 850	3
29.III	14 14	764 331 694	3
2.IV	17 10	732 493 970	3
2.IV	17 40	732 335 907	3
5.IV	13 40	710 315 644	2
5.IV	14 10	710 154 765	3
8.IV	17 00	685 886 036	3
15.IV	15 38	631 691 901	4
15.IV	16 04	631 553 218	4
15.IV	18 12	630 873 060	4
15.IV	18 52	630 660 953	3

деление мощности отраженных сигналов по запаздыванию и частоте, затем полученное распределение анализировалось с учетом корреляционных свойств зондирующего сигнала и закономерностей отражения сигналов поверхностью планеты [2, 7]. В результате анализа определялись запаздывание и доплеровская поправка частоты сигнала, отраженного от ближайшей к Земле области планеты, а также параметры, характеризующие отражательные свойства и рельеф ее поверхности.

Результаты измерения запаздывания и доплеровской поправки частоты отраженных сигналов приведены в табл. 1 и 2 соответственно. В первом столбце таблиц даны моменты начала излучений сигналов в системе Всемирного координированного времени UTC, во втором столбце — измеренные величины, третий столбец содержит среднеквадратичные ошибки измерений. Для удобства совместного использо-

Таблица 2. Доплеровская поправка при радиолокации Венеры в 1980 г.

Дата 1980 г.	Время излучения, час. мин	Измеренная доплеровская поправка, Гц	Среднеквадратичная ошибка, Гц
1.III	08 26	-64 236,25	0,12
15.III	08 10	-67 301,37	0,2
15.III	08 44	-67 283,16	0,1
15.III	09 18	-67 145,05	0,1
18.III	16 24	-65 282,28	0,1
18.III	16 58	-65 174,52	0,1
18.III	17 32	-65 008,73	0,06
18.III	18 30	-65 048,23	0,06
21.III	18 24	-65 650,14	0,06
29.III	13 12	-68 261,48	0,12
29.III	13 44	-68 065,12	0,06
29.III	14 14	-67 876,26	0,06
2.IV	16 40	-67 623,04	0,12
2.IV	17 10	-67 536,76	0,1
2.IV	17 40	-67 473,01	0,06
5.IV	13 12	-68 082,75	0,25
5.IV	13 40	-68 700,88	0,06
5.IV	14 10	-68 610,84	0,06
8.IV	17 00	-67 082,10	0,12
15.IV	15 04	-68 570,80	0,12
15.IV	15 38	-68 308,28	0,06
15.IV	16 04	-68 281,68	0,06
15.IV	18 12	-67 047,35	0,06
15.IV	18 52	-67 035,28	0,06

вания полученных данных с ранее опубликованными, результаты измерений приведены к антенне с координатами [8]  $\varphi = 45^{\circ}10'$ ,  $\lambda = 33^{\circ}15'$ , отнесенными к общему земному сфероиду МАС (большая полуось  $a_c = 6378140$  м, сжатие  $\alpha = 1/298,257$ ) и высотой  $H = 0$ . Номинальная частота радиолокатора [8]  $f_0 = 768719220$  Гц.

На рис. 1 показаны усредненные по дням наблюдений отклонения измеренных расстояний до Венеры от расчетных значений, вычислен-

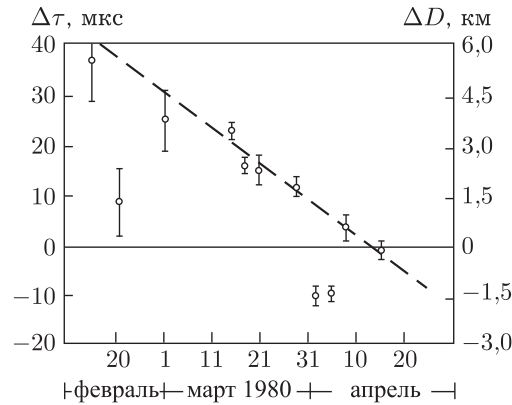


Рис. 1. Усредненные по дням наблюдений отклонения измеренных запаздываний  $\Delta\tau$  (слева) и соответствующих им расстояний до Венеры  $\Delta D$  (справа) от расчетных значений, вычисленных на основе численной теории [3]

ных на основе численной теории [3]. Как видно из этого рисунка, на интервале наблюдений максимальное отклонение измеренного расстояния от прогноза составляет примерно 6 км. При этом среднеквадратичные значения аппаратурно-методических ошибок измерений составляли 300–500 м на дальностях до планеты менее 140 млн км и 1–1,5 км на больших дальностях. Следует отметить, что отклонения измеренных расстояний от прогноза, вычисленного на основе аналитической теории Ньюкома с поправками Данкома, достигали 600 км, т. е. были в 100 раз больше, чем в случае использования численной теории движения планет [3].

Измеренные значения запаздывания, приведенные в табл. 1, были использованы при построении единой релятивистской теории движения внутренних планет [9].

## Рельеф поверхности Венеры

Отклонения измеренных расстояний до ближайшей точки поверхности от прогноза содержат две составляющие. Первая из них обусловлена ошибками прогнозирования движения планеты и носит регулярный характер. Вторая составляющая связана с вариациями высот поверхности планеты. Регулярная составляющая отклонения с высокой точностью может быть аппроксимирована [7] полиномом низкой степени. Тогда вариации измеренных отклонений (с противоположным знаком) относительно аппроксимирующей кривой, представленные в зависимости от долготы подлокаторной точки, можно рассматривать как профиль высот поверхности планеты. На рис. 1 регулярная составляющая  $\Delta D$  аппроксимировалась прямой линией (пунктирная линия), причем при

ее проведении из рассмотрения были исключены три точки, соответствующие измерениям 21.II, 2.IV и 5.IV 1980 г. Наблюдаемые в этих точках резкие кратковременные вариации величины  $\Delta D$  не могут быть объяснены ни ошибками измерений, ни другими причинами, кроме вариации высот самой поверхности.

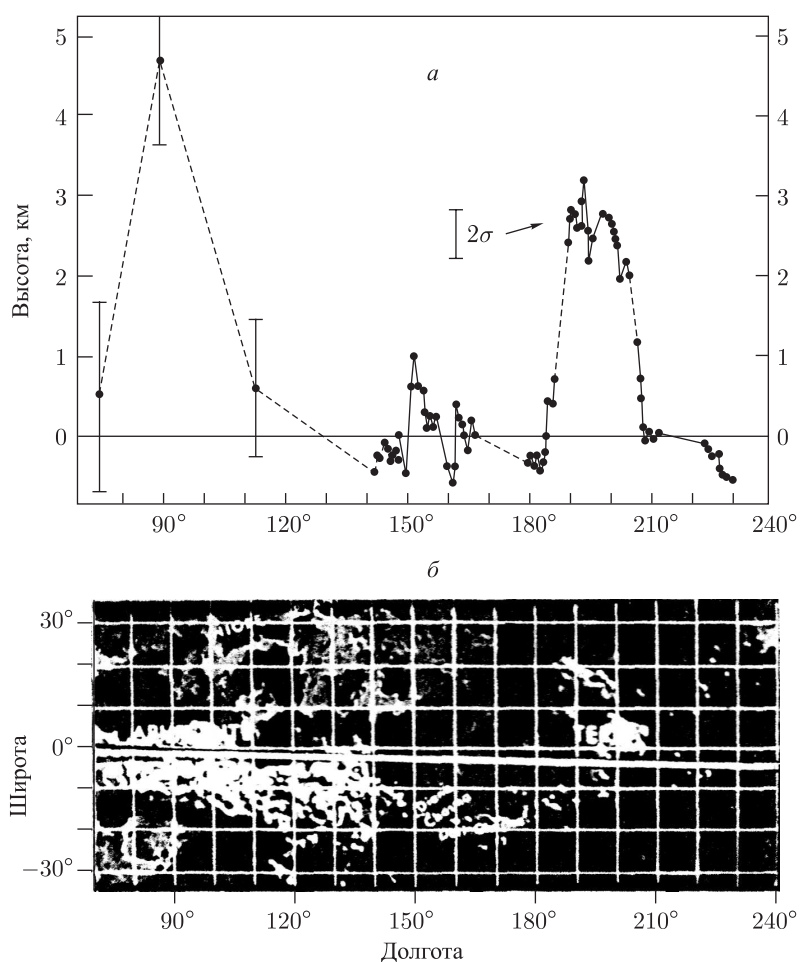


Рис. 2. Профиль высот поверхности Венеры (СССР, 1980 г.), полученный по радиолокационным наблюдениям на волне 39 см (а), и карта высот поверхности Венеры (б), полученная с помощью космического аппарата «Пионер-Венера» [10]. Белой линией показана трасса, вдоль которой измерялся профиль, приведенный в верхней части рисунка. Широта трассы изменялась от 1,0° ю.ш. на долготе 70° до 3,7° ю.ш. на долготе 230°

Профиль высот поверхности Венеры в интервале долгот  $145^{\circ}$ – $230^{\circ}$ , где уровень отраженного сигнала был достаточно высок, более детально исследовался также и другим методом [7], основанным на одновременном измерении расстояний до разных точек видимого экватора планеты, эхо-сигналы от которых разделялись путем анализа отраженного сигнала по запаздыванию и доплеровскому смещению частоты. В этом случае разрешение поверхности вдоль видимого экватора составляло около 40 км ( $0,4^{\circ}$  по долготе), что позволило получить более подробную структуру профиля в окрестностях восьми точек, указанных на рис. 1.

Построенный профиль высот поверхности Венеры вдоль трассы, широта которой изменялась от  $1^{\circ},0$  ю.ш. на долготу  $70^{\circ}$  до  $3^{\circ},7$  ю.ш. на долготу  $230^{\circ}$ , представлен на рис. 2, а. Как видно, в исследованной части поверхности Венеры наблюдаются две горные области, разделенные протяженной холмистой равниной. Первая из горных областей достигает высоты около 4,5 км вблизи долготы  $90^{\circ}$ , вторая — 2,5 км на долготу  $195^{\circ}$ . Протяженность этих областей составляет примерно 4 тыс. и 2,5 тыс. км соответственно.

На рис. 2, б приведена карта высот поверхности Венеры, полученная с помощью космического аппарата (КА) «Пионер–Венера» [10]. Здесь более ярким участкам соответствуют в целом большие высоты, причем дискретность изображения высот составляет 500 м. Трасса, вдоль которой измерялся профиль, приведенный на рис. 2, б, показана белой линией. Сравнение рис. 2, а и 2, б показывает, что профиль, полученный по наземным радиолокационным наблюдениям планеты, хорошо согласуется с измерениями, проведенными с помощью КА «Пионер–Венера».

Авторы выражают благодарность С. М. Барабошкину, В. П. Давыдову, О. Н. Дорощук, С. П. Игнатову, А. Н. Козлову, Ю. Ф. Колюке, В. П. Конофалову, З. Г. Кузнецовой, А. Г. Мелихову, Е. П. Молотову, А. С. Набатову, В. М. Подольянюку, Л. Ф. Соловьевой, А. Т. Тагаевскому, Ю. В. Филину, О. С. Шампаровой, С. А. Щетинникову, В. Н. Юрченко и другим участникам работ по радиолокации Венеры.

Институт радиотехники  
и электроники Академия наук СССР

Поступила в редакцию 7.I.1982

### Литература

1. Ю. Н. Александров, А. С. Вышлов, В. М. Дубровин и др. Докл. АН СССР, 1980, 255, 1334.
2. Ю. Н. Александров, Б. И. Кузнецов, Г. М. Петров, О. Н. Ржига. Астрон. ж., 1972, 49, 175.
3. М. Д. Кислик, Ю. Ф. Колюка, В. А. Котельников, Г. М. Петров, В. Ф. Тихонов. Докл. АН СССР. 1978, 241, 1046.
4. А. Л. Зайцев, Г. М. Петров. XI Всесоюзн. радиоастрономич. конф. по аппаратуре, антеннам и методам: Тезисы докл. Ереван, 1978, с. 279.



5. А. Л. Зайцев, Г. М. Петров. XI Всесоюзн. радиоастрономии, конф. по аппаратуре, антеннам и методам: Тезисы докл. Ереван, 1978, с. 277.
6. Г. М. Петров, А. Ф. Хасянов. XI Всесоюзн. радиоастрономич. конф. по аппаратуре, антеннам и методам: Тезисы докл. Ереван, 1978, с. 282.
7. Ю. Н. Александров, В. К. Головкин, В. М. Дубровин и др. Астрон. ж., 1980, 57, 237.
8. В. А. Котельников, Ю. Н. Александров, В. К. Головкин и др. Астрон. ж., 1979, 56, 405.
9. М. Д. Кислик, Ю. Ф. Колюка, В. А. Котельников, Г. М. Петров, В. Ф. Тихонов. Докл. АН СССР, 1980, 255, 545.
10. G. H. Pettengill et al. Scientific American, 1980, 243, 46.