

РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ВЕНЕРЫ В СОВЕТСКОМ СОЮЗЕ В 1962 г.

*В. А. Котельников, В. М. Дубровин, Б. А. Дубинский, М. Д. Кислик,
Б. И. Кузнецов, И. В. Лишин, В. А. Морозов, Г. М. Петров, О. Н. Ржига,
Г. А. Сыцко, А. М. Шаховской*

Доклады Академии наук СССР. 1963. Том 151, № 3

В печати уже сообщалось о проведении в 1962 г. Институтом радиотехники и электроники АН СССР совместно с рядом организаций повторной радиолокации планеты Венера [1]. Радиолокация производилась на той же установке [3], что и в 1961 г., в которую были внесены изменения в целях повышения точности и надежности измерений. Чувствительность установки, благодаря применению на входе приемника парамагнитного усилителя на кристалле рубина и повышению мощности передатчика, была увеличена примерно в 6 раз по сравнению с 1961 г. Смещение частоты отраженного сигнала, вызываемое эффектом Доплера из-за движения Венеры и Земли (с учетом ее вращения), компенсировалось по расчетной программе при помощи специального устройства, менявшего частоту гетеродина приемника ступеньками по 0,2 Гц.

Частота передаваемого сигнала через каждые 4,096 сек. периодически изменялась на 62,5 Гц для исключения среднего уровня шума в принятом сигнале. Частотный спектр отраженных от Венеры сигналов, записанных на магнитную ленту, исследовался при помощи 20-канального анализатора, аналогичного применявшемуся при радиолокации Венеры в 1961 г. [3, 4].

Средний спектр отраженных сигналов за 20 сеансов ¹⁾, проведенных с 20 X по 21 XII 1962 г., построенный по сумме измерений на обеих частотах, излучавшихся передатчиком, изображен на рис. 1, а. Анализ спектра производился фильтрами с полосой пропускания 1 Гц. По оси абсцисс на рисунке нанесены значения частот настройки фильтров анализатора f относительно частоты центрального фильтра f_0 , по оси ординат — величина p , представляющая отношение мощности отражен-

¹⁾ Каждый сеанс состоял из передачи и приема, длительность которых примерно равна времени распространения сигнала от Земли к Венере и обратно (4,5 ÷ 7 мин.).

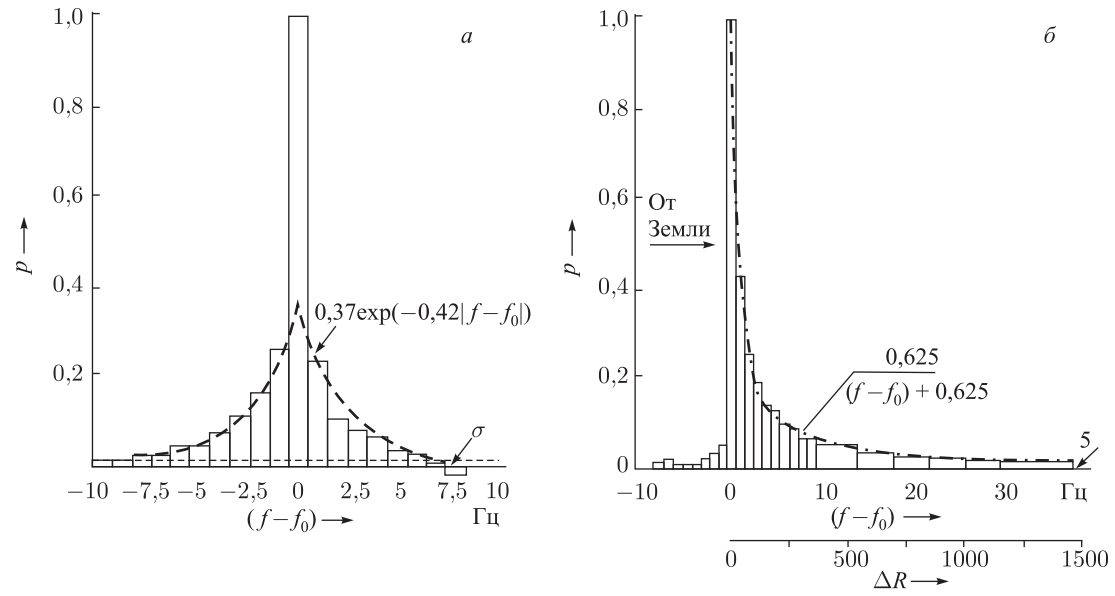


Рис. 1. Средний спектр отраженных сигналов. а — Полоса пропускания фильтров 1 Гц. б — Распределение по дальности энергии отраженных от Венеры сигналов с частотной модуляцией. Полоса пропускания фильтров 1 и 4 Гц

ного сигнала в полосе каждого фильтра к мощности сигнала в полосе центрального фильтра. Пунктиром отмечена величина среднеквадратичной погрешности измерений, вызываемой шумами. Спектр отраженных сигналов может быть аппроксимирован экспонентой (рис. 1, а)

$$p = 0,37 \exp(-0,42|f - f_0|). \quad (1)$$

Исключение составляет центральный фильтр, в котором уровень сигнала был больше, чем даваемый формулой (1).

Коэффициент отражения Венеры²⁾, измеренный по энергии отраженных сигналов в полосе 20 Гц, в течение двух месяцев менялся в пределах 12 ÷ 18%. Энергия отраженных сигналов в полосе 1 Гц была в 2,5–3 раза меньше полной энергии.

В 1962 г. исследовался также спектр широкополосной составляющей отраженных сигналов, наблюдавшейся в 1961 г. [2]. При этом передаваемый сигнал состоял из непрерывных периодических посылок, частоты которых отличались на 2000 Гц, длительностью по 4,096 сек. Одна из излучавшихся передатчиком частот не попадала в полосу частот, принимавшихся приемником. Полоса пропускания фильтров анализатора при исследовании широкополосной составляющей была 100 Гц. Измерения 1962 г. указывают на весьма вероятное наличие широкополосной составляющей в полосе 300 Гц примерно той же интенсивности, что и в 1961 г. [2], если исключить измерения за 18 IV 1961 г., когда интенсивность широкополосной составляющей была в несколько раз выше, чем в остальные дни измерений 1961 г. Ввиду меньшего по сравнению с 1961 г. числа сеансов, в которых вид модуляции передаваемых сигналов позволял исследовать широкополосную составляющую, происхождение последней надежно установить не удалось.

Для измерения расстояния от Земли до Венеры и распределения энергии отраженного сигнала по дальности в 1962 г. была применена линейная частотная модуляция. Частота излучаемых передатчиком колебаний периодически изменялась по пилообразному закону на 4000 Гц с периодом 1,024 сек. Благодаря применению специальной схемы была достигнута очень высокая линейность изменения частоты. В параметры модуляции вносились поправки, чтобы скомпенсировать изменение частоты из-за эффекта Доплера, вызываемое движением Венеры и Земли. При приеме частота гетеродина приемника изменялась также по пилообразному закону. Начало модуляции на приеме устанавливалось относительно начала модуляции на передаче по расчетной программе с точностью до 0,1 мсек. Если начало модуляции гетеродина на приеме точно соответствовало фактическому времени прихода отраженного сигнала, частота сигнала на выходе приемника была номинальной.

²⁾ Отношение энергии принятых сигналов к энергии сигналов, которые принимались бы, если бы Венера была гладким идеально проводящим шаром.

Если же отраженный сигнал приходил раньше или позже расчетного момента, то частота сигнала на выходе приемника становилась выше или ниже номинальной. По смещению спектра отраженного сигнала и его частей определялась поправка к расчетному времени распространения сигнала, а также распределение энергии сигналов в зависимости от дальности отражающей зоны.

Средний спектр отраженных от Венеры сигналов с частотной модуляцией по 48 сеансам наблюдений, проведенных с 21 X по 21 XII 1962 г., представлен на рис. 1, б. Анализ производился фильтрами с полосой пропускания по 1 и 4 Гц. По осям координат на рис. 1, б нанесены те же величины, что и на рис. 1, а. Смещение спектра по частоте, которое могло быть вызвано несовпадением начала модуляции гетеродина и прихода отраженных сигналов, исключалось гетеродинированием сигнала при воспроизведении магнитных записей так, что в каждом сеансе максимум спектра попадал в один и тот же фильтр.

Внизу рис. 1, б нанесена также ось дальности ΔR в расчете, что максимум спектра соответствует отражению от ближайшей к Земле точки Венеры, находящейся в центре видимого диска планеты. Интенсивность отражения убывает с увеличением дальности отражающей зоны, причем заметное отражение наблюдается еще в зонах, удаленных относительно ближайшей точки планеты на 1500 км, диаметр которых составляет примерно 2/3 диаметра Венеры. Данные рисунка 1, б можно аппроксимировать (см. рис. 1, б) гиперболой

$$p = 0,625(f - f_0 + 0,625)^{-1}. \quad (2)$$

Период вращения Венеры определялся по сопоставлению расчетной ширины спектра отраженного сигнала, полученного на основании рис. 1, б при разных периодах вращения, считая структуру поверхности Венеры изотропной, с шириной спектра, полученной экспериментально. Наблюдавшееся расширение спектра должно было вызваться двумя причинами: собственным вращением Венеры, которое постоянно, и кажущимся обеганием Венеры Землей, зависящим от их взаимного положения. Последняя составляющая может быть вычислена теоретически. Экспериментальные результаты за время с 20 X по 12 XII 1962 г. показывают, что, если ось вращения Венеры перпендикулярна плоскости эклиптики, то вероятнее всего обратное вращение (вращение в сторону, обратную движению Венеры вокруг Солнца) с периодом 200 ÷ 300 суток.

Результаты измерений расстояния между Землей и Венерой³⁾ по запаздыванию отраженных сигналов с частотной модуляцией представлены на рис. 2. Здесь Δr обозначает разность между фактическим

³⁾ Измеряемое расстояние менялось от 40 млн км (минимальное расстояние 13 XI 1962 г. во время нижнего соединения Венеры) до 65 млн км (21 XII 1962 г.).

и расчетным значениями расстояния от измерительного пункта до ближайшей точки поверхности Венеры. Около каждой экспериментальной точки на рисунке отмечены величины среднеквадратичной погрешности измерений. В единичном измерении среднеквадратичное значение аппаратной ошибки не превышало 15 км.

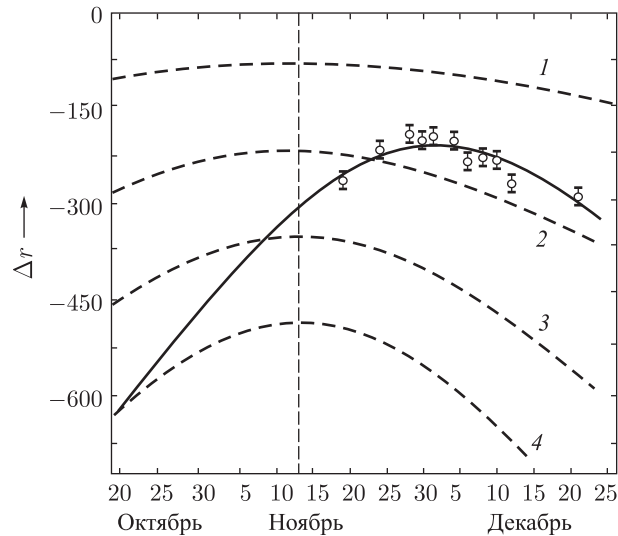


Рис. 2. Изменение расстояния между Землей и Венерой относительно расчетного значения. 1 — $A = 149\,599\,000$ км, 2 — $A = 149\,598\,500$ км, 3 — $A = 149\,598\,000$ км, 4 — $A = 149\,597\,500$ км

В расчетах времени распространения отраженных сигналов было принято: астрономическая единица $149\,599\,300$ км; скорость света $299\,792,5$ км/сек; радиус Венеры 6100 км.

Пунктирными линиями на рисунке показано, как изменялась бы величина Δr , если бы фактическое значение астрономической единицы было равно $A = 149\,599\,000, \dots, 149\,597\,500$ км и отсутствовали бы ошибки эфемерид. При $A = 149\,599\,300$ км результаты измерений должны были совпадать с осью абсцисс.

Представленные на графике экспериментальные точки не совпадают ни с одной из вычисленных кривых, что должно получиться, если в эфемеридах Земли и Венеры, по которым производился расчет времени распространения сигналов, содержатся ошибки. Плавная кривая, аппроксимирующая ход экспериментальных точек, была получена в предположении, что значение астрономической единицы $A = 149\,597\,900$ км, фактическое положение центра Венеры смещено вдоль орбиты на 270 км по движению (на $0,5$ угловых секунды в гелиоцентрической системе координат) и радиус Венеры на 80 км меньше величины, принятой в расчет.

Разность между астрономической единицей, полученной нами в 1961 г., и величиной, приведенной выше, составляет 1400 км, что находится в пределах допуска (± 2000 км), указанного для измерений 1961 г. [2]. Если, кроме указанных выше, варьировать и другие параметры орбиты Венеры, то значение астрономической единицы может быть несколько иным. Полная обработка данных, вероятно, позволит наряду с астрономической единицей уточнить также эфемериды Венеры.

На рис. 3, *a* представлена диаграмма огибающей отраженного от Венеры сигнала, полученная 24 XI 1962 г., когда в течение 4,5 мин. излучалась немодулированная несущая. Полоса пропускания прием-

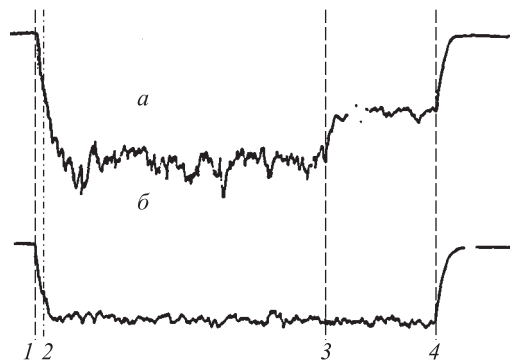


Рис. 3. Огибающая отраженного от Венеры сигнала: *a* — канал с сигналом; *б* — канал без сигнала. 1 — включение приемника, 2 — начало отраженного сигнала, 3 — конец отраженного сигнала, 4 — выключение приемника

ного канала до детектора (детектор — линейный) составляла 6 Гц, постоянная времени интегрирующей цепочки после детектора — 6 сек. Для сравнения на рис. 3, *б* представлена диаграмма огибающей шума в аналогичном канале, сдвинутом по частоте на 62,5 Гц, в котором сигнала не было.

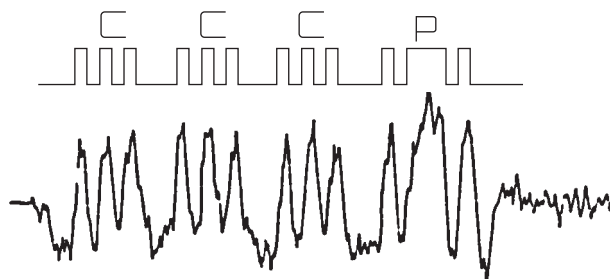


Рис. 4. Слово «СССР», переданное через Венеру 24 XI 1962 г.

Достаточно высокое отношение сигнал/шум, имевшее место, когда Венера находилась вблизи Земли, поддало мысль осуществить радиотелеграфную связь с использованием Венеры в качестве пассивного отражателя. В ноябре 1962 г. были переданы слова: «МИР», «СССР», «ЛЕНИН». На рис. 4 изображен вид переданного радиотелеграфным кодом слова «СССР», которое прошло общий путь в 85 млн км.

Авторы выражают благодарность Л. В. Апраксину, Р. С. Бондаренко, В. О. Войтову, М. М. Дедловскому, Н. М. Дмитриеву, В. С. Довгелло, В. И. Кривде, В. М. Махорину, Г. А. Подопригоре, Н. М. Синодкину, Г. И. Слободенюку, З. Г. Труновой, А. В. Францессону и Д. М. Цветкову, участвовавшим в подготовке и проведении измерений.

Институт радиотехники
и электроники Академии наук СССР

Поступило 20 VI 1963

Цитированная литература

1. Газета «Правда», 29 XII 1962 г.
2. В. А. Котельников, В. М. Дубровин и др., Радиотехника и электроника, 7, 11 (1962).
3. В. А. Котельников, Л. В. Апраксин и др., там же.
4. В. А. Морозов, З. Г. Трунова, там же.