

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОРБИТ ЗЕМЛИ И ВЕНЕРЫ, АСТРОНОМИЧЕСКОЙ ЕДИНИЦЫ И РАДИУСА ВЕНЕРЫ НА ОСНОВЕ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ВЕНЕРЫ В 1962–1977 гг.

*М. Д. Кислик, Ю. Ф. Колюка, академик В. А. Котельников, Г. М. Петров,
В. Ф. Тихонов*

Доклады Академии наук СССР. 1978. Том 241, № 5

Радиолокационная планетная астрономия, начало которой было положено в 1961 г. успешной радиолокацией Венеры, накопила большой фактический материал. Его обработка привела к таким известным результатам, как уточнение астрономической единицы, определение параметров собственного вращения Венеры, определение ряда физических характеристик планет и др. С повышением точности радиолокационных наблюдений [1] и увеличением временного интервала, охваченного ими, стало возможным использовать эти наблюдения для уточнения орбит (теорий движения) лоцируемых планет и Земли.

В настоящей статье описывается методика определения планетных орбит на основе радиолокационных наблюдений, разработанная Институтом радиотехники и электроники АН СССР совместно с рядом организаций, и приводятся результаты ее применения к обработке измерений, полученных при радиолокации Венеры в СССР и США в 1962–1977 гг.

Для описания движения больших планет используется система дифференциальных уравнений задачи n тел, т. е. чисто гравитационная теория. В качестве тел взяты Солнце, Меркурий, Венера, система Земля–Луна, Марс, Юпитер, Сатурн, Уран. Проведенные оценки показали, что влиянием Нептуна и Плутона в условиях данной задачи можно пренебречь. Система Земля–Луна в этих уравнениях представлена своим центром масс (барицентром). Геоцентрическое движение Луны, знание которого необходимо для перехода от барицентра к центру масс Земли, также описывается дифференциальными уравнениями, в которых учитывается влияние полярного сжатия Земли, притяжение Солнца и планет. Все уравнения составлены в прямоугольных координатах. Используются гелиоцентрическая и геоцентрическая (для Луны) геоэваториальные координатные системы эпохи 1960.0. Независимым

переменным является эфемеридное время. Интегрирование производится численно методом рекуррентных степенных разложений; при этом прямоугольные координаты планет и Луны представляются на каждом шаге отрезками степенных рядов, коэффициенты которых находятся последовательно по алгоритму [2].

Для оценки ошибки метода интегрирования (при шаге интегрирования и требовании к точности, выбранных для обработки радиолокационных наблюдений Венеры) были проведены контрольные расчеты на ЭВМ БЭСМ-6 одних и тех же интегральных кривых при прямом и обратном ходе времени. Для исключения ошибок округления расчеты выполнялись с двойным числом разрядов. На интервале в 20 лет для всех планет ошибки в положении не превысили 10 м.

Обработка измерений при определении планетных орбит производится по способу наименьших квадратов итерационным методом. Предварительно все измерения редуцируются с помощью известных соотношений [3, 4] для учета прецессии и нутации земной оси при переходе к эпохе 1960.0. Предусмотрена возможность совместной обработки как радиолокационных наблюдений планет, так и оптических наблюдений планет и Солнца, а также измерений параметров движения искусственных спутников планет наземными радиотехническими средствами.

Описанная методика была применена для определения орбит Венеры и Земли. Исходная измерительная информация включала значения времени запаздывания отраженного сигнала, полученные Институтом радиотехники и электроники АН СССР в 1962–1977 гг. [5, 6] (884 измерения), Аресибской ионосферной обсерваторией (Пуэрто-Рико) в 1964–1965 гг. [7] (71 измерение) и Лабораторией реактивного движения США в 1967 г. [8] (15 измерений), а также оптические измерения угловых координат Венеры и Солнца, выполненные Николаевской обсерваторией АН СССР в 1972–1975 гг. [9] (1889 измерений) и Морской обсерваторией США в 1960–1972 гг. [10] (3598 измерений). Кроме того, при оценке полученных результатов использовались радиотехнические измерения дальностей «Венера-9» и «Венера-10» (306 измерений). Расчеты проводились при значениях масс планет и Луны, приведенных в табл. 1. При переводе астрономической единицы из световых секунд в километры скорость света принималась 299 792,5 км/сек.

Определяемыми параметрами были оскулирующие элементы гелиоцентрических орбит барицентра системы Земля–Луна и Венеры, астрономическая единица A и радиус Венеры R_V . Для начала итерационного процесса определения орбит барицентра и Венеры и для описания движения остальных планет и Луны на интервале интегрирования использовались начальные условия, вычисленные по данным [11]. В качестве критерия точности полученного решения была выбрана разность фактического τ_f и расчетного τ_r времени запаздывания отраженного от поверхности Венеры сигнала как наиболее точная непосредственно

Таблица 1.

Планета	μ	Планета	μ
Земля-Луна	328900,1	Юпитер	1047,355
Венера	408522,7	Сатурн	3501,6
Меркурий	5972000	Уран	22869
Марс	3098720		

Примечание. μ — отношение массы Солнца к массе планеты. Отношение массы Земли к массе Луны 81,301.

экспериментально определяемая характеристика движения Венеры относительно Земли.

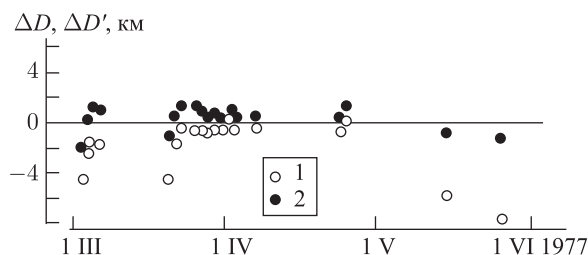


Рис. 1. Отклонения измеренных в 1977 г. дальностей до Венеры от прогноза, рассчитанного для двух вариантов: 1 — при уточнении только элементов орбит системы Земля-Луна и Венера, 2 — при совместном уточнении элементов орбит, радиуса Венеры и астрономической единицы

В первом варианте были обработаны все радиолокационные и оптические измерения 1960–1975 гг. с определением 12 неизвестных элементов орбит барицентра системы Земля-Луна и Венеры и рассчитан прогноз движения Земли и Венеры на 1977 г. Астрономическая единица и радиус Венеры не уточнялись. Их значения были приняты равными: $A = 149\,597\,890,5$ км (499,004 780 0 световых секунд), $R_B = 6050$ км. Результаты сравнения прогноза и данных радиолокации Венеры в 1977 г. представлены на рис. 1, где разность $\Delta\tau = \tau_\phi - \tau_p$ пересчитана в разность дальностей ΔD . На мерном интервале среднеквадратические значения разности дальностей $\sigma_{\Delta D}$ монотонно уменьшаются от 12 км в 1962 г. до 1,7 км в 1975 г., что отражает повышение точности радиолокационных наблюдений. Среднеквадратические отклонения оптических измерений от полученного решения на мерном интервале практически не изменяются и составляют $0'', 6-1'', 2$. При пересчете в координаты планет эти отклонения в среднем превышают $\sigma_{\Delta D}$ в 50–300 раз.

Характер изменения отклонений ΔD со временем показывает, что они могут быть уменьшены соответствующими изменениями астроно-

мической единицы и радиуса Венеры. Поэтому во втором варианте обработки параметры \mathcal{A} и R_B были включены в число неизвестных. Полученные результаты приведены в табл. 2. Так как радиолокационные наблюдения в основном охватывают полосу широт на поверхности Венеры в пределах $\pm 20^\circ$ и интервал долгот около 140° , то уточненное значение R_B следует считать средним радиусом Венеры для этой области. Точность полученного решения характеризуется отклонениями $\Delta \mathcal{D}'$ измеренных дальностей от прогнозируемых, показанными на рис. 1. На всем трехмесячном интервале наблюдений эти отклонения не превосходят 2 км и в значительной мере обусловлены влиянием рельефа Венеры [12]. Как и следовало ожидать, включение на окончательном этапе обработки радиолокационных наблюдений Венеры в 1977 г. в исходную измерительную информацию практически не изменило данных табл. 2.

Таблица 2.

Эпоха $t_0 = \text{JD } 2\,440\,000.5 = 24 \text{ V } 1968, 0^{\text{h}} \text{ET}$		
Элементы	Земля-Луна	Венера
Большая полуось a , астр. ед.	0,999 982 797	0,723 328 141
Эксцентриситет e	0,016 752 728	0,006 757 532
Аргумент перигелия ω , рад	1,783 278 865	2,162 783 367
Наклонение i , рад	0,409 162 897	0,426 892 105
Долгота восходящего узла Ω , рад	0,000 001 235	0,139 360 110
Время прохождения через узел t_Ω	JD 2 440 122 595 125 02	JD 2 439 976.981 049 3

Примечания. Астрономическая единица $\mathcal{A} = 149\,597\,888,9 \text{ км} \pm 0,7 \text{ км}$ ($499,004\,774\,6 \pm \pm 0,000\,002\,2$ световых секунд), радиус Венеры $R_B = 6\,052,3 \text{ км} \pm 0,3 \text{ км}$. Приведенные среднеквадратичные ошибки являются формальными, полученными по внутренней сходимости при обработке измерений.

Было проведено также сравнение измеренных радиотехническим дальномером R_Φ и расчетных R_p дальностей искусственных спутников «Венера-9» и «Венера-10» от точки наблюдения на Земле. Афродитоцентрические орбиты спутников определяли по радиальным скоростям с использованием данных табл. 2. На рис. 2 показаны разности $\Delta R = R_\Phi - R_p$ на интервале в 7 месяцев, охватывающем участки орбит Земли и Венеры между нижним и верхним соединениями. Так как значения R_p содержат по сравнению с τ_p дополнительные ошибки определения орбит спутников, то, естественно, разности ΔR превышают величины $\Delta \mathcal{D}'$. Однако и они лежат в пределах 20 км. На рис. 2 изображены также разности $\Delta R'$ измеренных и расчетных дальностей для «Венеры-9» и «Венеры-10» при определении их орбит с использованием данных [11].

Отклонения $\Delta \mathcal{D}''$ дальностей до Венеры, рассчитанных по данным [11], от полученного решения показаны для 1977–1982 гг. на рис. 3.

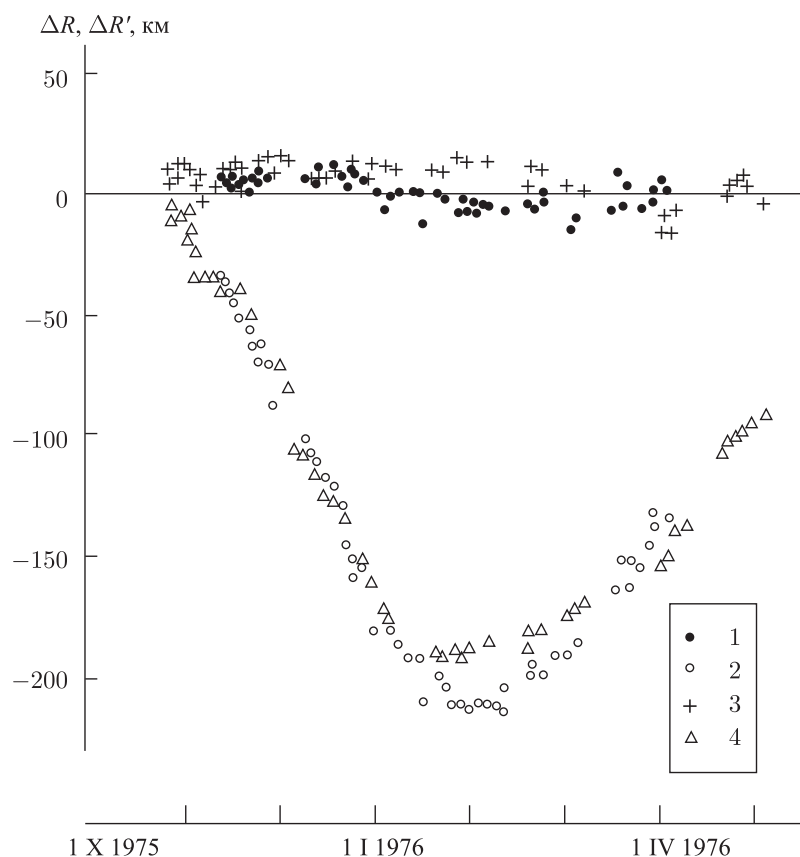


Рис. 2. Отклонения от расчетных значений измеренных расстояний до ИСВ «Венера-9» (1, 2) и «Венера-10» (3, 4) для двух вариантов определения орбит планет Венеры и Земли: 1, 3 — по уточненным в работе орбитам планет; 2, 4 — по орбитам: планет, вычисленным с использованием данных [11]

Величины $\Delta D''$ и $\Delta R'$ характеризуют ошибки классических теорий движения Земли и Венеры; на рассматриваемом интервале времени они доходят до 500 км. Аналогичные результаты получены при обработке радиолокационных наблюдений Венеры и Институте прикладной математики АН СССР [12].

Резюмируя, отметим, что в задачах, связанных с обеспечением полетов к Венере, целесообразно вместо классических теорий движения Земли и Венеры использовать орбиты, определенные на основе радиолокационных наблюдений Венеры. Систематическое накопление и обработка новой радиолокационной информации позволит по мере необходимости уточнять эти орбиты.

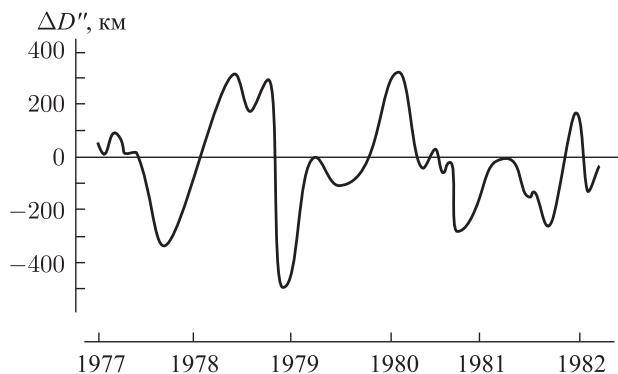


Рис. 3. Отклонения гелиоцентрических расстояний $\Delta D''$ Венеры и Земли, вычисленных с использованием данных [11], от прогнозируемых расстояний, полученных по уточненным в работе орбитам планет

Авторы выражают благодарность всем участникам работ по радиолокации Венеры на Центре дальней космической связи.

Институт радиотехники
и электроники Академии наук СССР,
Москва

Поступило 19 IV 1978

Литература

1. Ю. Н. Александров, Б. И. Кузнецов и др., *Астрон. журн.*, т. 49, 175 (1972).
2. J. F. Steffensen, *Kong. Danske Videnskab. Selskab. Mat.-Fys., Med.*, v. 30, 18 (1956).
3. Н. И. Идельсон, Редукционные вычисления в астрономии, Приложение к астрономическому ежегоднику СССР на 1941 год.
4. E. W. Woolard, *Astron. Papers*, v. 15, Part I, Washington, 1953.
5. В. А. Котельников и др., *Астрон. журн.*, т. 50, 836 (1973).
6. В. А. Котельников и др., *Астрон. журн.*, т. 53, 1270 (1976).
7. G. H. Pettengill, R. B. Dyce, D. V. Campbell, *Astron. J.*, v. 72, 3 (1967).
8. R. M. Goldstein, *Astron. J.*, v. 73, 9 (1968).
9. О. Т. Маркина, В. П. Ситилев, Склонения Солнца, Меркурия, Венеры, Марса и Юпитера, полученные из наблюдений на вертикальном круге Николаевской обсерватории, Гл. астрономическая обсерватория АН СССР, Николаев, 1975.
10. U.S.N.O. Circ. NN 103, 105, 115, 118, 127, 143.
11. *Астрономический ежегодник СССР с приложением, 1960–1980.*
12. В. К. Головкин, Б. И. Кузнецов и др., *Радиотехника и электроника*, т. 21, 1801 (1976).
13. Э. А. Аким, В. А. Степаньянц, *ДАН*, т. 233, 314 (1977).