

УТОЧНЕНИЕ АСТРОНОМИЧЕСКОЙ ЕДИНИЦЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАДИОЛОКАЦИИ ПЛАНЕТЫ ВЕНЕРА В 1961 г.

В. А. Котельников, Б. А. Дубинский, М. Д. Кислик, Д. М. Цветков

Искусственные спутники Земли. 1963. Вып. 17

Задача определения величины астрономической единицы приобрела в последние годы особую актуальность, так как расчеты орбит межпланетных кораблей требуют высокой точности знания величины астрономической единицы в километрах.

Если известен экваториальный горизонтальный параллакс Солнца P_{\odot} , то астрономическая единица A вычисляется по формуле

$$A = \frac{a_0}{\sin P_{\odot}}, \quad (1)$$

где a_0 — экваториальный радиус Земли.

Определение параллакса Солнца P_{\odot} всегда находилось в центре внимания астрономов. За последние полтора столетия различными методами было получено около двухсот значений этой величины. Большинство из них имеет в настоящее время только историческую ценность. Определения последних десятилетий, пересчитанные в астрономическую единицу, приведены на рис. 1 [1]. Здесь же указаны результаты определения астрономической единицы по лучевым скоростям звезд, т. е. способом, непосредственно не связанным с определением параллакса Солнца.

Как видно из рис. 1, разброс возможных значений величины A достигает сотен тысяч километров. Кроме того, если рассматривать попарно номинальные значения и оценки ошибок определения астрономической единицы, приводимые различными авторами, то в большинстве случаев окажется, что они не соответствуют друг другу («поля допусков» не перекрываются). Это говорит о наличии неучтенных ошибок в данных, собранных на рис. 1. В целом эти данные показывают, что определение астрономической единицы классическими методами не позволяет получить высокую точность.

Принципиально новые возможности определения астрономической единицы открывает радиолокация планет солнечной системы. В противоположность косвенным классическим методам радиолокация планет

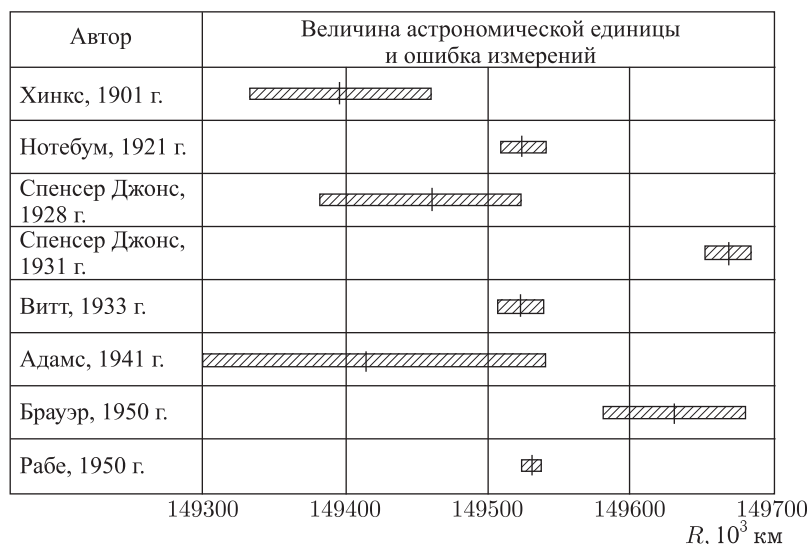


Рис. 1. Значение астрономической единицы по измерениям различных авторов

позволяет проводить с высокой точностью прямые измерения расстояний, что наиболее удобно для определения астрономической единицы.

Первые опыты радиолокации планеты Венера (Прайс, 1958 г.; Эванс, 1959 г.) не позволили, однако, уточнить значение астрономической единицы. В связи с недостаточным потенциалом радиолокаторов надежность полученных данных была относительно невысокой (90%); как выяснилось в настоящее время, полученные значения A были ошибочными (возможно, что за отраженный сигнал в этих экспериментах был ошибочно принят случайный всплеск шумового характера).

Уточнение величины A путем обработки радиотехнических наблюдений искусственной планеты Пионер V также не дало положительных результатов. Фактическая ошибка полученного значения астрономической единицы $A = (149,548\,5004 \pm 0,013\,500) \cdot 10^6$ км в несколько раз превысила оценку авторов и составила около $0,05 \cdot 10^6$ км. Следует отметить, что уточнение A с помощью радиоизмерений орбит искусственных планет солнечной системы — более сложная задача, чем уточнение A путем радиолокации естественных планет, эфемериды которых заранее известны с высокой степенью точности (в астрономических единицах). При обработке радиоизмерений орбит искусственных планет определение величины A проводится совместно с уточнением фактических параметров орбиты. Это неминуемо снижает при прочих равных условиях точность определения астрономической единицы.

В апреле 1961 г. Институтом радиотехники и электроники Академии наук СССР (ИРЭ АН СССР) совместно с рядом других организаций была успешно осуществлена радиолокация планеты Венера. Ниже

излагаются методика и результаты уточнения величины астрономической единицы по данным этого эксперимента ¹⁾).

Обработка радиолокационных наблюдений Венеры позволила получить следующие параметры отраженного сигнала, осредненные за сеанс наблюдения (продолжительность около 5 мин) и явившиеся исходными данными для определения астрономической единицы:

$\Delta\tau$ — разность фактического и расчетного времени запаздывания;

Δf_d — разность фактического и расчетного доплеровского смещения частоты.

Под временем запаздывания в данном случае понимается время распространения сигнала от антенны до ближайших к Земле участков поверхности Венеры и обратно. Доплеровское смещение частоты, использованное для уточнения астрономической единицы, соответствовало узкополосной составляющей спектра принимаемого сигнала, т. е. отражению от ближайших к Земле участков поверхности Венеры. Расчетные значения времени запаздывания τ_p и доплеровского смещения частоты $f_{д,р}$ определялись на быстродействующих электронных машинах на основании таблиц, составленных под руководством Д. К. Куликова в Институте теоретической астрономии Академии наук СССР (ИТА АН СССР). Эти таблицы состояли из двух разделов:

а) таблицы положений и скоростей центра массы Венеры и центра масс системы Земля – Луна в невращающейся гелиоцентрической экваториальной системе прямоугольных координат. За единицу измерения длины принята астрономическая единица. Таблицы составлены на основании аналитической теории Ньюкома с учетом поправок к элементам орбиты Венеры (по данным Данкома [5]) и системы Земля–Луна (по данным Моргана, подтвержденным в ИТА АН СССР по наблюдениям Солнца за 1925–1953 гг.);

б) таблицы положений и скоростей Луны в невращающейся геоцентрической экваториальной системе прямоугольных координат. За единицу измерения длины принят экваториальный радиус Земли. Таблицы составлены на основании теории Брауна с учетом рекомендаций, принятых VIII съездом Международного астрономического союза.

При вычислениях были приняты следующие значения констант:

астрономическая единица 149 474 400 км,

скорость света в вакууме $c = 299\,792,5$ км · сек⁻¹,

радиус планеты Венера $R_2 = 6100$ км.

Измеренное значение астрономической единицы A может быть выражено через величины $\Delta\tau$ или Δf_d с помощью соотношения

$$A = A_p + \Delta A = A_p \left(1 + \frac{\Delta\tau \pm nT_n}{\tau_p} \right) \quad (n = 0, 1, 2, \dots), \quad (2)$$

¹⁾ Описание эксперимента, устройство радиолокатора и способы обработки принятых сигналов приведены в [2–4].

$$A = A_p + \Delta A = A_p \left(1 + \frac{\Delta f_d}{f_{d,p} - f_d} \right), \quad (3)$$

где T_n — интервал неоднозначности определения величины $\Delta\tau$, имевший для различных сеансов наблюдений значения 128 и 256 мсек; f_d — доплеровское смещение частоты, обусловленное вращением Земли вокруг оси и вокруг центра масс системы Земля – Луна.

После обработки результатов измерения среднее значение A , вычисленное по разности доплеровского смещения частоты Δf_d , оказалось равным $A = 149\,598\,000$ км. Отклонения от среднего для отдельных сеансов наблюдений не превышали 30 000 км. Это позволило уверенно раскрыть неоднозначность, имеющуюся при определении величины A по результатам измерений $\Delta\tau$, так как ошибка в $\Delta\tau$ на величину $T_n = 256$ мсек приводила бы к ошибке в A , равной $(120 - 130) \cdot 10^3$ км (в зависимости от расстояния Венеры до Земли).

Предварительные данные о величине A , полученные на основании обработки измерений $\Delta\tau$ за несколько сеансов, появились в печати [6] до того, как были обработаны измерения Δf_d . При этом раскрытие неоднозначности проводилось на основании астрономических данных (см. рис. 1), что повлекло за собой ошибочное определение A .

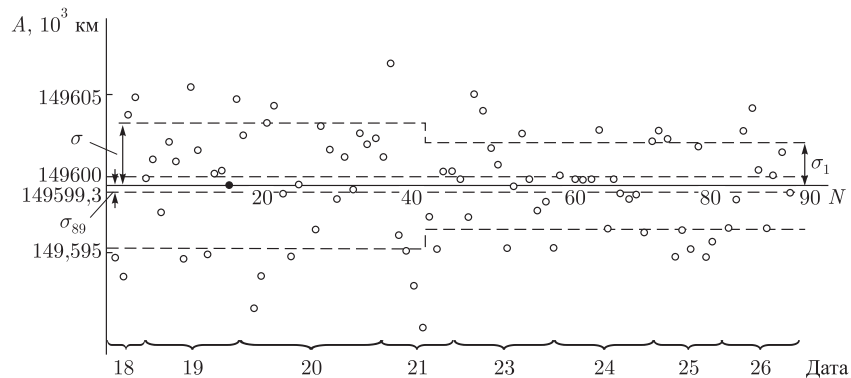


Рис. 2. Вычисленные по формуле (2) значения астрономической единицы A для каждого сеанса наблюдений с 18 по 26 апреля 1961 г.: По оси абсцисс отложены номера сеансов N ; штриховая линия с изломом — среднеквадратичная ошибка одного измерения σ_1 ; штриховая прямая линия — среднеквадратичная ошибка среднего значения A (получена по 89 измерениям — σ_{89}); сплошная линия — $A_{sp} = 149\,593\,300$ км; $\sigma_{89} = 330$ км

Измерения $\Delta\tau$ позволили значительно точнее определить величину A , чем измерения Δf_d . Значения A , вычисленные по формуле (2) для каждого сеанса наблюдения, приведены на рис. 2. Средние суточные значения A (за каждый день наблюдений) указаны в таблице.

Дата, апрель 1961 г.	Число обработанных наблюдений	Среднее суточное значение A , км
18	4	149 599 225
19	13	149 600 150
20	19	149 600 160
21	9	149 599 050
23	13	149 599 600
24	13	149 599 150
25	9	149 597 850
26	9	140 599 750
Среднее взвешенное по всем наблюдениям		149 599 300

Среднее значение A , полученное по данным измерений $\Delta\tau$ для всех обработанных сеансов наблюдений, равно

$$A_{\text{ср}} = (149\,599\,300 \pm 330) \text{ км.}$$

Небольшой разброс (менее 2300 км) средних суточных значений A относительно $A_{\text{ср}}$ подтверждает правильность раскрытия неоднозначности, так как в противном случае при ошибке в определении запаздывания τ на величину $T_{\text{п}}$ суточное значение A за период с 18 по 26 апреля изменилось бы на 11 000 км.

Указанная выше погрешность определения величины A (330 км) является среднеквадратичной ошибкой, вычисленной с учетом разброса значения A , вызванного флуктуационными ошибками измерения $\Delta\tau$, и с учетом ошибок ввода задержки $\tau_{\text{р}}$ в радиотехническую аппаратуру. Однако, кроме флуктуационных ошибок, на полученное значение $A_{\text{ср}}$ повлияли также различные систематические ошибки, максимальные значения которых оцениваются следующим образом [4].

1. Ошибка, вызванная неточным знанием времени задержки сигнала в радиотехнической аппаратуре, — 1020 км.
2. Ошибка, вызванная неопределенностью расположения отражающих участков на поверхности Венеры, — меньше 135 км.
3. Ошибка, вызванная влиянием среды, в которой распространялся сигнал, — 60 км.
4. Ошибка, вызванная неточным знанием скорости света в вакууме, — 300 км.
5. Ошибка, вызванная неточным знанием радиуса Венеры, — 660 км.
6. Ошибки, вызванные неточным знанием остальных констант (радиус Земли, отношение масс Луны и Земли и др.), — менее 30 км.

К систематическим ошибкам следует отнести также ошибки определения эфемерид. По данным [7] точность координат больших планет характеризуется значениями, приведенными ниже.

	$\Delta\rho_{\text{макс}}$, км	$\Delta l_{\text{макс}}$, км
Венера	128	428
Земля – Луна	72	155

Через $\Delta\rho_{\text{макс}}$ и $\Delta l_{\text{макс}}$ обозначены максимальные ошибки в направлении вдоль гелиоцентрического радиуса-вектора и в перпендикулярном к нему направлении в плоскости орбиты. Суммарные максимальные ошибки Δr расчета расстояния Земля – Венера, вызванные погрешностями координат больших планет, и соответствующие им ошибки определения астрономической единицы δA , рассчитанные по приведенным выше данным, следующие.

Дата, апрель 1961 г.	Δr , км	δA , км
19	147	500
23	160	525
27	184	575

Ошибки таблиц геоцентрических координат Луны составляют не более 10–15 км. При пересчете этих ошибок в ошибки определения положения центра Земли относительно центра масс системы Земля – Луна они должны быть уменьшены в 81,53 раза. Следовательно, ошибки Δr расчета расстояния Земля – Венера, обусловленные неточностями астрономических таблиц, практически будут равны ошибкам, указанным выше. Ошибки в величине астрономической единицы, вызванные неточностью вычислений и приближенным характером формулы (2), не превышают 50 км.

Все перечисленные систематические ошибки приводят к суммарной максимальной ошибке, равной приблизительно 1400 км. С учетом флуктуационных ошибок измерений, максимальная величина которых может быть принята равной трем-четырем среднеквадратичным ошибкам (1000 ÷ 1300 км), следует считать, что общая максимальная ошибка определения астрономической единицы составляет около 2000 км.

Теоретическая оценка вероятности того, что в данном эксперименте был обнаружен сигнал, отраженный от Венеры, не имеет практического смысла, так как надежность этого факта подтверждается тем, что все 89 наблюдений хорошо согласуются с движением Венеры на всем интервале времени от 18 до 26 апреля.

Таким образом, результат определения величины астрономической единицы в ИРЭ АН СССР по данным радиолокационных наблюдений планеты Венеры в 1961 г. оказался следующим:

$$A = (149\,599\,300 \pm 2000) \text{ км.}$$

В 1961 г. успешная радиолокация Венеры впервые была осуществлена и за рубежом — в США и Англии. Результаты определения A по данным радиолокации Венеры были следующими:

Джодрел Бенк (Англия)	(149 600 000 ± 5000) км	[8]
Линкольновская лаборатория Мас-сачузетского технологического института (США)	(149 597 700 ± 1500) км	[9]
Лаборатория реактивных двигателей Калифорнийского технологического института (США)	(149 598 500 ± 500) км	[10]

Максимальная разность номинальных значений астрономической единицы, полученных различными наблюдателями по данным радиолокации Венеры в 1961 г., не превышает 2300 км. Это указывает на хорошее согласие результатов всех измерений астрономической единицы.

Как следует из приведенного анализа ошибок определения величины астрономической единицы, возможность дальнейшего ее уточнения по радиолокационным измерениям скоро будет ограничена неточным значением эфемерид планет. Поэтому возникает необходимость организации комплексных оптических и радиолокационных наблюдений для уточнения законов движения планет. Успешная радиолокация Венеры, проведенная в СССР в 1961 г., ставит решение этой задачи на вполне реальную основу.

Дата поступления 23 августа 1962 г.

Цитированная литература

1. J. B. McGuire, E. R. Spangler, L. Wong. *Scient. Amer.*, 204, № 4, 74, 1961.
2. В. А. Котельников, В. М. Дубровин и др. Докл. АН СССР, 145, 1035, 1962.
3. В. А. Котельников, Л. В. Апраксин и др. *Радиотехника и электроника*, 7, 1850, 1962.
4. В. А. Котельников, В. М. Дубровин и др. *Радиотехника и электроника*, 7, 1860, 1962.
5. R. L. Duncombe. *Astronomical Papers, US Naval Observatory, Motion of Venus*, 16, pt. 1. Washington, 1958.
6. Газета «Правда», от 12 мая 1961 г.
7. Д. К. Куликов, Н. С. Субботина. Сб. «Проблемы движения искусственных небесных тел». Изд-во АН СССР, 1963, стр. 172.
8. J. H. Thomson, G. N. Taylor et al. *Nature*, 189, 519, 1961.
9. The Staff, Millstone Radar Observatory. *Nature*, 190, 592, 1961.
10. L. R. Malling, S. W. Golomb. *J. Brit. IRE*, 22, 297, 1961.