

Э. Л. АКИМ, В. А. СТЕПАНЬЯНЦ, З. П. ВЛАСОВА

**УТОЧНЕНИЕ МАСС ЗЕМЛИ И ЛУНЫ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ
ЗА ДВИЖЕНИЕМ УДАЛЯЮЩИХСЯ ОТ ЗЕМЛИ АВТОМАТИЧЕСКИХ
МЕЖПЛАНЕТНЫХ СТАНЦИЙ «ВЕНЕРА-4», «ВЕНЕРА-5»,
«ВЕНЕРА-6» И «ВЕНЕРА-7»**

(Представлено академиком М. В. Келдышем 29 IX 1971)

Исследуется гравитационное влияние системы Земля — Луна на движение удаляющейся от Земли автоматической межпланетной станции (АМС). Движение станции в течение двух первых месяцев ее полета происходит с почти постоянной скоростью, величина которой определяется интегралом геоцентрической энергии траектории (т. е. скоростью станции при бесконечном удалении ее от Земли). Неточность знания гравитационной константы (μ) системы Земля — Луна вызывает ошибку в расчетном значении интеграла энергии. Эта ошибка приводит к рассогласованиям фактических и расчетных значений скорости станции и ее расстояния от Земли. Рассогласования в скорости движения станции на указанном интервале полета сохраняются примерно постоянными, рассогласования в расстоянии возрастают по времени полета почти линейно.

Погрешность знания отношения масс (γ) небесных тел в системе Земля — Луна также служит источником нерасчетных возмущений движения АМС. Возникающие при этом рассогласования фактических и расчетных параметров движения станции содержат компоненту, периодически зависящую от времени. Амплитуда периодической зависимости пропорциональна величине погрешности отношения, а период колебаний совпадает с периодом обращения Луны вокруг Земли. Для иллюстрации характера и величины рассмотренных возмущений в работе приведены изменения расчетных параметров движения АМС «Венера-5», обусловленные ошибками в величинах гравитационной константы $\Delta\mu = 2 \text{ км}^2/\text{сек}^2$ (рис. 1) и отношения масс $\Delta\gamma = 0,016$ (рис. 2). В качестве параметров движения на этих рисунках представлены наклонная дальность (D) и радиальная скорость (\dot{D}) станции относительно наземного измерительного пункта.

Для описания траектории движения станции и движения Луны, Солнца и планет в работе использована декартова прямоугольная геоэквиаториальная система координат XUZ . Начало системы координат совпадает с центром масс Земли, направления осей неподвижны относительно звезд. Плоскость XU системы совпадает с плоскостью среднего экватора Земли эпохи 1960.0, ось X направлена в точку весеннего равноденствия этой эпохи, а ось Z дополняет систему координат до правой.

Возмущенное движение АМС описано в этой системе координат системой дифференциальных уравнений. Правые части дифференциальных уравнений содержат учет возмущений, обусловленных гравитационным влиянием Луны, Солнца и планет, нецентральностью гравитационного поля Земли и световым давлением. Расчет положений Луны проведен с помощью теории движения Брауна с учетом рекомендаций, принятых VIII и XII съездами МАС. Вычисление геоцентрических положений Солнца и планет опиралось на теории гелиоцентрического движения Ньюкома для Земли и планет. Значение астрономической единицы при этом принималось равным

$A = 149597900$ км. Расчет траектории движения АМС произведен численным интегрированием указанной системы дифференциальных уравнений с начальными условиями (1).

Для уточнения постоянных тяготения Земли (μ_{\oplus}) и Луны ($\mu_{\text{л}}$) использованы радиотехнические измерения параметров движения АМС «Венера-4, -5, -6, -7» на траекториях перелета Земля — Венера. В процессе предварительной обработки измеренные радиотехнические параметры интерпретированы в виде баллистических величин наклонной дальности и радиальной скорости АМС относительно наземных измерительных пунктов. Проведено сжатие однородной траекторной информации каждого се-

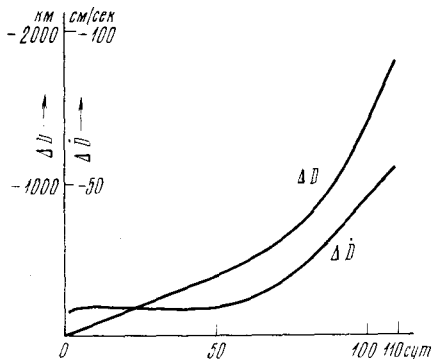


Рис. 1

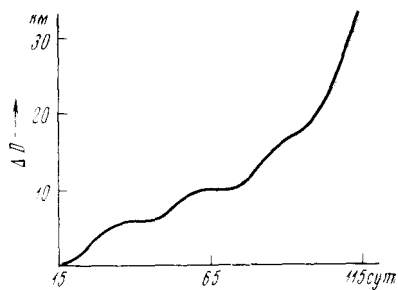


Рис. 2

анса измерений с заменой ее осредненными значениями измеряемых величин — «нормальными местами» (н.м.). Объем первичной измерительной информации, переработанной на стадии предварительной обработки, количество сформированных «нормальных мест» и интервал времени, в течение которого проведены использованные в работе траекторные измерения, указаны для каждой АМС в табл. 1.

Таблица 1

АМС	Дата старта	Дата коррекции	Интервал обработан. измерений	Объем первичной информации (число измер.)	Число н. м.	
					D	\dot{D}
«Венера-4»	12 VI 1967	29 VII 1967	12 VI—5 X 1967	17 200	40	63
«Венера-5»	5 I 1969	14 III 1969	5 I—23 IV 1969	14 000	42	41
«Венера-6»	10 I 1969	16 III 1969	10 I—23 IV 1969	13 900	34	48
«Венера-7»	17 VIII 1970	2 X 1970	17 VIII—12 XI 1970	26 200	65	97

Полученная совокупность «нормальных мест» подвергнута статистической обработке с целью совместного определения постоянных тяготения Земли и Луны и параметров движения АМС. Обработка проведена методом наименьших квадратов. Для повышения точности определения гравитационных констант разработана методика обработки, позволившая динамически увязать траекторные измерения на большой мерной базе, охватывающей участки траектории до и после ее коррекции.

При аппроксимации с необходимой точностью фактического координатного перемещения центра масс станции на участке работы корректирующего двигателя в методике использована расчетная модель «импульсной коррекции», момент приложения которой отнесен к середине временного интервала работы двигателя. В качестве определяемых параметров движения для каждой АМС выбраны девять кинематических параметров траектории в момент коррекции в системе координат XYZ и коэффициент λ ,

характеризующий световое давление:

$$\bar{V}_i \{V_{x_i}, V_{y_i}, V_{z_i}\}, \quad \bar{r}_i \{x_i, y_i, z_i\}, \quad \bar{W}_i \{W_{x_i}, W_{y_i}, W_{z_i}\}; \quad \kappa_i. \quad (1)$$

Определяемые кинематические параметры i -й АМС ($i = 4, 5, 6, 7$) представлены в (1) вектором скорости \bar{V} нескорректированной траектории, радиус-вектором \bar{r} положения станции в момент коррекции и вектором скорости \bar{W} траектории, полученной в результате коррекции.

Для получения изохронных частных производных от текущих кинематических переменных АМС в системе координат XYZ по уточняемым параметрам (используемых в методе наименьших квадратов при формировании нормальной системы линейных уравнений) численно интегрируется система дифференциальных уравнений в вариациях для уравнений движения.

Уточнение гравитационных постоянных осуществлялось в два этапа. На первом этапе уточнение проводилось по измерениям траектории движения каждой АМС отдельно.

Решалась 12-параметрическая задача совместного определения постоянных (μ_{\oplus} и μ_{ζ}) и параметров (1) движения станции по данным измерений траектории на участках до и после ее коррекции. Полученные при таком уточнении числовые значения постоянных и среднеквадратические ошибки единицы веса (σ_0) измерений содержатся в 2—5 строках табл. 2. Для численного подтверждения корректности использованной выше методики обработки траекторных измерений на большой мерной базе, содержащей излом траектории пассивного полета АМС, проведена обработка измерений на участке чисто пассивного полета станции при ее удалении от Земли. В ходе решения 9-параметрической задачи в этом случае, наряду с постоянными тяготения, определялись шесть кинематических параметров траектории станции и коэффициент, характеризующий световое давление.

Т а б л и ц а 2

	Измерит. информ.	σ_0	μ_{\oplus} (км ³ /сек ²)	μ_{ζ} (км ³ /сек ²)	μ_{\oplus}/μ_{ζ}
«Венера-4,-5,-6,-7»	до и после коррекции траектории	0,33	398600,37	4902,716	81,3005
«Венера-4»		0,37	398600,89	4902,806	81,3006
«Венера-5»		0,42	398600,26	4902,702	81,3022
«Венера-6»		0,25	398600,72	4902,638	81,3033
«Венера-7»		0,30	398599,45	4902,808	81,3002
«Венера-5,-6»		0,26	398600,57	4902,682	81,3026
«Венера-5»	до коррекции траект.	0,40	398599,72	4902,717	81,3018
«Венера-6»		0,26	398600,73	4902,642	81,3033

Результаты такого определения постоянных, проведенного для АМС «Венера-5» и «Венера-6», содержатся в 7-8 строках табл. 2. Они хорошо согласуются с полученными выше (см. 3-4 строки табл. 2) более точными значениями гравитационных постоянных.

На втором этапе для определения постоянных тяготения Земли и Луны привлекалась вся совокупность траекторных измерений АМС «Венера-4,-5,-6,-7». При этом решалась 42-параметрическая задача совместного уточнения гравитационных констант и параметров движения перечисленных АМС. Полученные на первом этапе числовые значения параметров (1) движения каждой АМС явились хорошим «начальным приближением» для итерационного решения этой многопараметрической задачи. В результате решения получены (см. строку 1 табл. 2) следующие математические ожидания для гравитационных постоянных Земли и Луны, которые вместе с максимальными возможными ошибками составили

$$\mu_{\oplus} = (398600,37 \pm 1) \text{ км}^3/\text{сек}^2, \quad \mu_{\zeta} = (4902,716 \pm 0,10) \text{ км}^3/\text{сек}^2. \quad (2)$$

Ошибки определения постоянных тяготения обусловлены аппаратурными ошибками траекторных измерений и принятыми ошибками в величине астрономической единицы и среднего расстояния Луны.

Числовые значения ошибок определения гравитационных постоянных получены апостериорными статистическими оценками. Дополнительным подтверждением их надежности служит фактическое рассеивание математических ожиданий μ_{\oplus} и μ_{ζ} , полученных в вариантах обработки отдельных выборок траекторной информации (строки 2—8 табл. 2). Это фактическое рассеивание целиком содержится в области ошибок (2).

Поступило
6 VII 1971