

ФОТОГРАФИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ ПРОХОЖДЕНИЯ МЕРКУРИЯ ПО ДИСКУ СОЛНЦА 7 МАЯ 2003 г В ПУЛКОВЕ НА 26-ДЮЙМОВОМ РЕФРАКТОРЕ.

А.А.Киселев, Т.П.Киселева, И.С.Измайлов, М.А.Можаев, О.А.Калиниченко,
М.Л.Ховричева.

Приводятся результаты фотографических наблюдений прохождения Меркурия по диску Солнца 7 мая 2003 г, выполненные в Пулкове на 26-дюймовом рефракторе. Определены величины момента - t_0 и ρ_0 - максимального сближения, а также средняя скорость относительного движения. Результаты совпадают с данными эфемериды DE405 с точностью до ошибок $\pm 0.12''$ по ρ_0 и $\pm 2.7^\circ$ по t_0 .

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ. Грант № 04-02-16157.

1. ВВЕДЕНИЕ.

7 мая 2003 г в Пулкове на 26-дюймовом рефракторе были выполнены фотографические наблюдения прохождения Меркурия по диску Солнца. Научная задача наблюдений заключалась в определении ключевых параметров явления: t_0 и ρ_0 - момента и величины максимального сближения и относительной скорости μ изображений Меркурия и Солнца вблизи t_0 - на основе методики наблюдений и их редукции, использующих ряд прямых измерений расстояний Меркурия от центра Солнца, полученных в течение прохождения. Эти параметры, коль скоро они определяются непосредственно из наблюдений, могут служить хорошим контролем существующим теориям движения Меркурия.

2. НАБЛЮДЕНИЯ.

При организации наблюдений прохождения Меркурия мы воспользовались опытом подобных наблюдений, полученным в ноябре 1973 г [1]. Наблюдения производились фотографическим методом с помощью 26-дюймового рефрактора Zeiss'a (D/F = 650/10400 mm), при диафрагме, сокращающей диаметр объектива до 200 мм. Использовались пластинки формата 13 x 18 см типа ORWO NP-27, WO-1, WO-3, сохранившиеся в небольшом количестве после программ наблюдений 80-90-х годов. Вуаль на этих пластинках вследствие долгого хранения оказалась неравномерной плотности, неодинаково распределенной по краям разных пластинок. Поэтому для наблюдений мы использовали пластинки названных типов вперемежку, применяя экспозиции 0.5, 1 и 2 сек., соответственно сортам эмульсии. В кассетах, дополнительно к постоянным фильтрам ЖС-18, мы поместили темносиние пленочные фильтры, позволявшие рассматривать изображение Солнца диаметром 96 мм невооруженным глазом. Погода в общем благоприятствовала наблюдениям, лишь изредка проходили легкие облака. В целом за время наблюдений с 9 часов утра до 14 часов 30 минут по Московскому летнему декретному времени удалось получить 55 пластинок. В начале наблюдений зенитное расстояние Солнца составляло почти 66 градусов, в конце наблюдений - 43 градуса, причем Солнце только что прошло через меридиан.

3. ИЗМЕРЕНИЯ.

После проявления и просмотра пластинок годными к измерениям пришлось признать только 32 пластинки, остальные - забраковать ввиду крайне неблагоприятного распределения вуали. Измерения производились визуально на измерительной машине Аскорекод с автоматической регистрацией отсчетов шкал. На каждой из пластинок делалось от 100 до 150 наведений (с поворотом призмы) на край изображений Солнца и повторные измерения изображений Меркурия в начале и в конце измерений. В результате этих измерений для каждой пластинки определялись измеренные координаты центра изображения Солнца и вычислялось расстояние Меркурия от этого центра. Положение центра Солнца определялось как положение центра симметрии наивероятнейшего эллипса, наилучшим образом представлявшего фигуру измеренного изображения Солнца. Соответствующие вычисления были выполнены с помощью итерационного процесса, использующего способ наименьших квадратов на каждом шаге. В итоге этого процесса координаты центра изображения Солнца (x_s, y_s) определялись с ошибкой порядка 10 - 20 микрон (0.2" - 0.4") с большим разбросом для отдельных пластинок, а координаты Меркурия (x, y) с ошибкой порядка 3 - 5 микрон (0.06' - 0.10"). Побочным результатом измерений можно считать величины больших полуосей эллипсов изображений Солнца и их сжатия $\alpha = (a-b)/a$, полученные для каждой из пластинок. Эти величины оказались в следующих пределах. Полуось a : 950" - 954", сжатие α : $(1.8 - 0.3) \cdot 10^{-3}$. В дальнейших исследованиях эти оценки не использовались.

4. АСТРОМЕТРИЧЕСКАЯ РЕДУКЦИЯ.

В итоге выполнения этапов наблюдений и измерений для всех 32-х пластинок были определены величины расстояний Меркурия от центра Солнца.

$$r_j = \sqrt{(x_j - x_{0j})^2 + (y_j - y_{0j})^2}, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

а также соответствующие им моменты мирового и звездного времени UT_j и S_j .
Переход от измеренных расстояний r_j к истинным ρ_j , отнесенным к небесной сфере, был выполнен по стандартной методике [2]:

$$\rho_j = M_0 \left[1 + \beta (1 + t g^2 \zeta_j \cos^2 \theta_j) \right] r_j \quad (2)$$

Здесь $M_0 = 19.8078$ "/мм - геометрический масштаб 26-дюймового рефрактора,
 ζ - зенитное расстояние Солнца в момент наблюдения j -ой пластинки,
 θ - позиционный угол направления SM (от Солнца -S к Меркурию - M) относительно направления на зенит (Z).

$$\theta = \psi - \chi \quad (3)$$

где ψ и χ - позиционные углы направлений SM и SZ в экваториальной системе на момент наблюдений. В нашей задаче угол ψ вычислялся приближенно согласно эфемериде DE405.

$$\operatorname{tg}\psi = \frac{15(\alpha_M - \alpha_S)^s \cos \delta_S}{(\delta_M - \delta_S)''} \quad (4)$$

а угол χ и зенитное расстояние ζ вычислялись согласно векторным формулам тангенциальных координат [2]

$$\operatorname{tg}\chi = \frac{K_1}{K_2}; \quad \operatorname{tg}\zeta = \sqrt{K_1^2 + K_2^2} \quad (5)$$

где K_1 и K_2 - тангенциальные координаты зенита (как звезды с координатами S и φ , отнесенные к системе с началом в Солнце (α_S, δ_S) на момент наблюдений.

$\beta = \beta(\zeta, T, B, \lambda)$ - коэффициент рефракции, зависящий от условий наблюдений и эффективной длины волны астрографа. В наших условиях при $\lambda = 5500 \text{ \AA}$,

$T = 273 + 10^\circ$, $B = 1013 \text{ мб}$, β - было принято равным

$$\beta = 58.217'' - 0.087'' \operatorname{tg}^2 \zeta \quad (6)$$

Результаты вычислений согласно формулам (2) - (6) отражены в таблице 1, где для каждой пластинки приведены ρ_j и соответствующие им $(UT)_j$, зенитные расстояния ζ , а также невязки выравнивания $(O-C)_j$, полученные при определении параметров прохождения μ , ρ_0 и t_0 согласно модели (7) (см. раздел 5).

Таблица 1. Исходные данные для вычисления параметров сближения.

№ пластинки	Момент сближения h m s (UT)	ζ°	ρ''	(O-C) ''
21438	5 13 29.7	65.81	952.24	0.42
21439	5 22 23.3	64.70	928.13	0.20
21440	5 29 30.4	63.94	909.14	-0.26
21442	5 39 22.7	62.62	884.14	-0.45
21443	5 47 33.2	61.62	864.15	-0.77
21445	5 57 37.0	60.41	840.41	- *)
21447	6 15 55.3	58.25	802.79	-0.72
21448	6 25 41.4	57.12	785.83	0.69
21450	6 49 23.4	54.48	747.84	0.41
21451	6 54 39.7	53.94	741.04	0.57
21452	6 59 11.9	53.46	734.96	0.03
21454	7 15 58.2	51.78	718.55	0.40
21455	7 17 24.1	51.62	717.55	0.54
21457	7 28 13.1	50.58	709.62	-0.14
21458	7 29 28.8	50.46	709.29	0.19
21459	7 31 16.2	50.30	708.09	-0.12
21461	7 43 53.0	49.17	703.99	-0.02
21463	8 04 19.1	47.51	704.77	-0.27
21464	8 18 39.8	46.47	711.27	-0.27
21467	8 32 05.1	45.61	721.75	-0.06
21469	8 36 44.8	45.34	725.65	-0.65
21470	8 50 34.2	44.61	742.12	-0.15
21472	9 02 23.6	44.10	759.25	0.32
21474	9 14 03.5	43.68	761.04	-
21477	9 29 36.4	43.28	806.11	-0.72
21479	9 50 27.5	43.04	851.11	-0.30
21482	10 01 28.0	43.04	877.94	0.64

21483	10 02 01.1	43.04	878.77	0.13
21484	10 11 24.9	43.13	902.41	0.45
21485	10 12 39.5	43.15	904.96	-0.16
21489	10 21 44.4	43.30	926.77	0.06
21492	10 31 22.0	43.53	950.49	-

*) Пластинки № 21445, 21474, 21492 – отброшены при итерациях.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ.

Для определения геометрических параметров наблюдаемого прохождения Меркурия по диску Солнца, т.е. величин t_0 - момента сближения, ρ_0 - минимального расстояния и μ - скорости относительного движения, мы воспользовались кинематической моделью, в которой точка М (Меркурий) движется прямолинейно с постоянной скоростью μ около точки S (Солнце), причем наблюдаемыми величинами в этой модели являются только расстояния ρ , изменяющиеся со временем t . Искомые параметры в этой модели связаны следующей простой формулой:

$$\rho_j = \sqrt{\rho_0^2 + \mu^2 (t_j - t_0)^2} \quad , \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

Чтобы определить наиболее вероятные значения параметров, удовлетворяющих (7), мы воспользовались следующими условными уравнениями поправок

$$\rho_j - \rho_j^* = \frac{-\tau_j \mu^2}{\rho_j} \Delta t_0 + \frac{\mu \tau_j^2}{\rho_j} \Delta \mu + \frac{\rho_0}{\rho_j} \Delta \rho_0 \quad (8)$$

Здесь $\tau_j = t_j - t_0^*$, а Δt_0 , $\Delta \mu$ и $\Delta \rho_0$ - поправки к принятым значениям t_0^* , μ^* , ρ_0^* в первом (нулевом) приближении. Приближенные величины этих параметров легко определяются из условий симметрии процесса: t_0 соответствует $\rho_{\min} = \rho^*$,

$$\mu^* \approx \frac{\sqrt{\rho_j^2 - \rho_0^{*2}}}{t_j - t_0^*} \quad , \quad (9)$$

причем μ^* желательно вычислять дважды при $t_j > t_0^*$ и при $t_0^* > t_j$. В условиях нашей задачи мы использовали следующие нулевые приближения для искомым параметров:

$$t_0^* = 7^h 44^m.00, \quad \rho_0^* = 704'', \quad \mu^* = 0.07200''/\text{sec} \quad . \quad (10)$$

Далее для определения наиболее вероятных величин параметров мы воспользовались итерационным процессом, включающим решение систем уравнений (8), причем на каждом шагу определялись поправки и новые значения параметров по способу наименьших квадратов. В условиях нашей задачи этот итерационный процесс закончился на 4-м шаге после отсева трех из 32 пластинок. Были получены следующие величины параметров.

$$\begin{aligned} t_0 &= 7^h 51^m 55.^s1 \pm 2.^s7 \\ \rho_0 &= 703.''25 \pm 0.''12 \\ \mu &= 0.067477 \pm 0.000033 \quad (''/\text{sec}) \end{aligned} \quad (11)$$

$$\sigma_1 = \pm 0.44'', \quad n = 29$$

Эфемериды DE405 дает следующие значения тех же величин для Пулковы:

$$\begin{aligned} t_0 &= 7^h 52^m 06^s.9 \\ \rho_0 &= 703''.177 \\ \mu &= 0.067470 \text{ (\"/sec)} \end{aligned} \quad (12)$$

Как видим, существенное расхождение имеет место только в определении t_0

$$\Delta t_0 = t_{0Pu} - t_{0eph} = -11^s.8 \quad (\pm 2^s.7) \quad (13)$$

Анализ данных сравнения подсказал нам, что Δt_0 может зависеть от неучета в нашей модели ускорения в относительном движении Меркурия и Солнца. В этой модели полный отрезок трассы прохождения Меркурий проходит со средней скоростью $\bar{\mu}$

$$\sigma = \bar{\mu}(t_k - t_n) = \bar{\mu}\tau_{нк} \quad (\tau_{нк} = 18500^s), \quad (14)$$

но тот же путь и за то же время $\tau_{нк}$, но двигаясь с ускорением, Меркурий проходит согласно (15):

$$\sigma = \mu\tau_{нк} + \frac{1}{2}\dot{\mu}\tau_{нк}^2 \quad (15)$$

Таким образом, имеем:

$$\bar{\mu} = \mu + \frac{1}{2}\dot{\mu}\tau_{нк} = 0.067477 \quad (16)$$

и

$$\mu = \bar{\mu} - \frac{1}{2}\dot{\mu}\tau_{нк} = 0.067343 \quad (17)$$

Здесь величина $\bar{\mu}$ получена из наблюдений согласно (11), а величина ускорения

$$\dot{\mu} = 1.34'' \cdot 10^{-8} \quad (1/\text{сек}^2) \quad (18)$$

оценена согласно данным эфемериды DE405, как среднее ускорение в относительном движении Меркурия и Солнца за время наблюдений $5^h 08^m 20^s = 18500$ сек.

Сравнивая (16) и (17) заключаем, что скорость Меркурия согласно принятой модели в начале прохождения - больше "истинной" (с учетом ускорения) и меньше - в конце.

За одно и то же время $\tau_1 = \frac{\tau_{нк}}{2} = 9250$ сек Меркурий пройдет дугу

$$\sigma_1 = \bar{\mu}\tau_1 = 624.16'' \quad (19)$$

в первом случае и дугу

$$\sigma_2 = \mu\tau_1 + \frac{1}{2}\dot{\mu}\tau_1^2 = 623.54'' \quad (20)$$

во втором случае. Отметим, что величина μ согласно (17) соответствует относительной скорости Меркурия в начале наблюдений и положение Меркурия на трассе прохождения с учетом ускорения вычисляется по формуле (20). Таким образом, в одну и ту же точку трассы (вблизи середины прохождения) согласно принятой модели Меркурий придет раньше на

$$\Delta t = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\bar{\mu}} = -9^s.2 \quad (21)$$

Этот результат в пределах ошибок наблюдений практически совпадает с данными эфемериды.

$$t_{0Pu} - t_{0eph} = -11^s.8 \pm 2^s.7 \quad (22)$$

Таким образом, результаты пулковских наблюдений прохождения Меркурия по диску Солнца подтверждают - по крайней мере, с точностью до ошибок $\pm 0.12''$ по ρ_0 и $\pm 2^s.7$ по t_0 - принятую в настоящее время теорию движения Меркурия.

ЛИТЕРАТУРА.

1. А.А.Киселев, Н.Ф.Быстров. Известия ГАО, 1974, № 194, с.139-148.
2. А.А.Киселев. Теоретические основания фотографической астрометрии. Москва, Наука, 1989, 264 с.

The Photographic Observations of Mercury transit in front of the Sun at 7 of May 2003 in Pulkovo with 26-inch Refractor.

A.A.Kiselev, T.P.Kiseleva, I.S.Izmailov, M.A.Mozhaev, O.A.Kalinichenko, M.L.Khovritcheva.

The results of photographic observations of Mercury transit in front of the Sun at 7 of May 2003 in Pulkovo Observatory by 26-inch Refractor are discussed. Parameters of transit: the time - t_0 , the value of minimum distances - ρ_0 and the relative velocity of Mercury to the Sun during the transit have been determined. These parameters obtained by observations showed good agreement to the Ephemerides DE405: the corresponding errors are $\pm 2.7^s$ for t_0 and $\pm 0.12''$ for ρ_0 . The works have been carried out with the support of RFBR (№ 04-02-16157).