

УДК 521.8/9:520.8

Об учете поправок за влияние фазы при позиционных наблюдениях Меркурия

Т. И. Самусенко

Проанализированы различные методы учета фазовых поправок на основе наблюдений Меркурия, проведенных в Ташкенте на меридианном круге в 1981—1986 гг. Выведено уравнение для вычисления поправок по методу, предложенному Г. К. Горелем.

ON CORRECTION FOR DEFECTIVE ILLUMINATION IN MERCURY POSITIONAL OBSERVATIONS, by Samusenko T. I.— Different methods of the correction for defective illumination using Mercury observations made by the author with the Tashkent transit circle in 1981—1986 are analysed. The equation for the correction method of Gorel' is derived.

Систематические ошибки позиционных наблюдений тел Солнечной системы могут привести к снижению точности поправок элементов орбит и нуль-пунктов опорного каталога при их улучшении [8, 9]. Для уменьшения влияния систематических ошибок необходимы их изучение и учет или (по возможности) исключение при наблюдениях. Поправки к прямым восхождениям и склонениям, вызванные влиянием фазы планеты при ее наблюдениях, имеют систематический характер. Поэтому важно правильно разработать методы их учета для конкретной планеты при определенном способе ее наблюдения.

В геометрическом методе фазовые поправки $\Delta\alpha_l$ и $\Delta\delta_l$ имеют вид [12]:

$$\Delta\alpha_l = \begin{cases} 0.5t(1 - |\cos \varphi|), & \text{если } i < 90^\circ, \\ 0.5t(1 - |\cos \Theta|), & \text{если } i \geq 90^\circ, \end{cases} \quad (1)$$

$$\Delta\delta_l = \begin{cases} 0.5r(1 - |\cos \psi|), & \text{если } i < 90^\circ, \\ 0.5r(1 - |\sin \Theta|), & \text{если } i \geq 90^\circ, \end{cases} \quad (2)$$

где t — время прохождения видимого радиуса планеты r через меридиан (для всех планет, кроме Юпитера и Сатурна, звездное время

$$t^s = \frac{r''}{15} \frac{3609.86^s \sec \delta}{3609.86^s - (1/24)v(\alpha)},$$

$v(\alpha)$ — суточное изменение прямого восхождения в момент кульминации в секундах времени [1]); Θ — позиционный угол точки наибольшей освещенности; i — угол фазы, причем $\sin \varphi = \sin i \sin \Theta$, $\Delta\alpha_l < 0$ при $0 < \Theta < 180^\circ$; $\sin \psi = \sin i \cos \Theta$, $\Delta\delta_l > 0$ при $90^\circ < \Theta < 270^\circ$ (индекс l показывает, что формулы основаны на измерении расстояния между наведением на освещенный и ущербленный края диска планеты при прохождении его через меридиан).

По методам эмпирическому и основанному на законах для идеальных рассеивателей указанные поправки определяются соотношениями [6]:

$$\Delta\alpha = k(i)t \sin Q, \quad \Delta\delta = k(i)r \cos Q, \quad (3)$$

где $Q = \Theta + 180^\circ$; $k(i)r$ — расстояние между геометрическим и световым

центрами. Приведем формулы для нахождения $k(i)$ в зависимости от фазового угла i : эмпирическое соотношение, предложенное Ньюкомом [13],—

$$k_n(i) = (1/12)(1 - \cos i)(5 + \cos i); \quad (4)$$

формула, основанная на законе зеркального отражения света от поверхности планеты [11],—

$$k_r(i) = \sin(i/2); \quad (5)$$

соотношение, опирающееся на метод ортотропного рассеяния света отражающей поверхностью планеты [2, 5],—

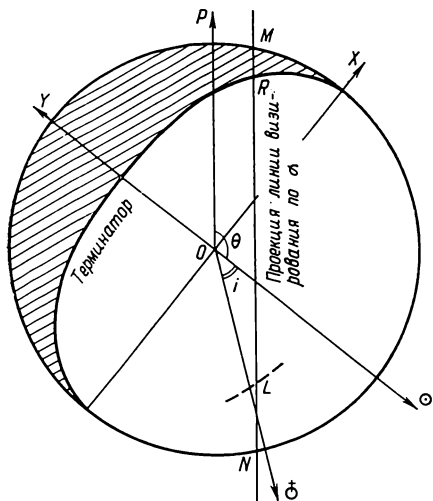
$$k_o(i) = [3\pi \sin i(1 + \cos i)]/\{16[\sin i + (\pi - i) \cos i]\}; \quad (6)$$

формула, основанная на законах рассеяния Ломмеля — Зеслигера для твердых поверхностей [7],—

$$k_{ls}(i) = \{2 \operatorname{tg}(i/2)[\sin i + (\pi - i) \cos i]\}/\{3\pi[1 - \sin(i/2) \operatorname{tg}(i/2) \ln |\operatorname{ctg}(i/4)|]\} \quad (7)$$

По методу, предложенному Г. К. Горслем [3], фазовые поправки определяются в предположении, что при наблюдениях планеты по видимому центру нить микрометра рассекает ее на две освещенные части, равные по площади. К сожалению, в этой работе даны лишь таблицы для $i \leq 90^\circ$ без формул, на которых они основаны. Поэтому приведем вывод формул для всех фазовых углов.

Выведем сначала формулы для нахождения поправок в прямые восхождения планеты, полученные из наблюдений по принципу равных площадей. Выберем правую прямоугольную систему координат XOY в картинной плоскости с изображением планеты, начало которой O совпадает с геометрическим центром диска планеты (рисунок). Ось OY имеет направление, противоположное направлению на Солнце (OP — направление на полюс мира). Пусть $\Delta\alpha_s = k(i, \Theta)t$ — поправка за влияние фазы по способу равных площадей, где $k(i, \Theta)$ — коэффициент, зависящий от фазового угла i и позиционного угла Θ , который необходимо найти. Для упрощения дальнейших выкладок примем, что планета представляет собой круг и $t=1$. Тогда терминатор — эллипс с малой осью равной $r \cos i$ и $S/2 = (\pi/4)(1 + \cos i)$, где S — площадь освещенной части диска планеты. Эту



Вид планеты в картинной плоскости при $i < 90^\circ$, $90^\circ < \Theta < 180^\circ$

же полуплощадь (например, справа от оси визирования) можно представить с помощью определенных интегралов, пределы которых вычисляются через абсциссы (x_M, x_N, x_R, x_L) точек пересечения оси визирования с окружностью (M, N) и эллипсом (R, L) (рисунок). Абсциссы же этих точек определяются следующими соотношениями через углы i, Θ и коэффициент $k(i, \Theta)$:

$$x_M = k(i, \Theta) \cos \Theta + \sin \Theta \sqrt{1 - k^2(i, \Theta)},$$

$$x_N = k(i, \Theta) \cos \Theta - \sin \Theta \sqrt{1 - k^2(i, \Theta)},$$

$$x_R = \sec^2 \varphi (k(i, \Theta) \cos \Theta + \cos i \sin \Theta \sqrt{\cos^2 \varphi - k^2(i, \Theta)}), \quad (8)$$

$$x_L = \sec^2 \varphi (k(i, \Theta) \cos \Theta - \cos i \sin \Theta \sqrt{\cos^2 \varphi - k^2(i, \Theta)}).$$

После вычислений интегралов и небольших упрощений получим уравнение следующего вида:

$$\begin{aligned} & \sin \Theta [\arcsin A + A \sqrt{1 - A^2} - \arcsin B - B \sqrt{1 - B^2} - \\ & - \cos i (\arcsin C + C \sqrt{1 - C^2} - \arcsin D - D \sqrt{1 - D^2})] - \\ & - \cos \Theta (A^2 - B^2 + C^2 - D^2) + 2k(i, \Theta) (A - B + C - D) - \\ & - \pi/2 (1 + \cos i) \sin \Theta = 0. \end{aligned} \quad (9)$$

Если ось визирования пересекает терминатор в одной точке, то в этом уравнении

$$A = x_M, \quad B = -1, \quad C = -1, \quad D = x_L \quad \text{при } 0 \leq \Theta < 90^\circ, \quad 270^\circ < \Theta \leq 360^\circ,$$

$$A = 1, \quad B = x_N, \quad C = x_R, \quad D = 1 \quad \text{при } 90^\circ < \Theta < 270^\circ;$$

если ось визирования пересекает терминатор в двух точках, то

$$A = x_M, \quad B = x_N, \quad C = x_R, \quad D = x_L \quad \text{при } 0 < \Theta < 180^\circ,$$

$$A = x_N, \quad B = x_M, \quad C = x_L, \quad D = x_R \quad \text{при } 180^\circ < \Theta < 360^\circ;$$

если ось визирования не пересекает терминатор, то

$$A = x_M, \quad B = x_N, \quad C = 0, \quad D = 0 \quad \text{при } 0 < \Theta < 180^\circ,$$

$$A = x_N, \quad B = x_M, \quad C = 0, \quad D = 0 \quad \text{при } 180^\circ < \Theta < 360^\circ.$$

C и D должны принимать конкретные и равные значения, соответствующие условиям непрерывности при переходе от случаев, когда ось визирования пересекает терминатор в одной или двух точках, к случаю, когда она не пересекает его. Условие $C = D = 0$ принято лишь для упрощения записи; на непрерывности и однозначности решения уравнения (9) относительно $k(i, \Theta)$ оно не сказывается. Решение уравнения (9) относительно $k(i, \Theta)$ выполняется методом итерации.

В случае наблюдений планеты по склонению систему координат XOY необходимо повернуть на 90° и повторить изложенную выше процедуру. Уравнение для определения коэффициентов $k'(i, \Theta)$ поправки $\Delta \delta_s = k'(i, \Theta) r$ можно так же легко получить из уравнения (9) и формул (8). В табл. 1 мы приводим коэффициенты $k(i, \Theta)$ и $k'(i, \Theta)$ для различных фазовых и позиционных углов, так как их вычисления из уравнений сложны и трудоемки.

Теперь рассмотрим, как фазовые поправки по описанным методам влияют на значения прямых восхождений Меркурия, которые получены автором в 1981—1986 гг. В связи с малыми угловыми размерами Меркурия наблюдения проводились по центру освещенной части диска. Всего за четыре года (с июля 1982 по июнь 1984 г. наблюдения автором не проводились) получено 95 прямых восхождений Меркурия, из них при западной элонгации 59, при восточной — 36 с привязкой к дневным наблюдениям звезд FK4 (около 2000). Полученные положения Меркурия сравнивались с новой эфемеридой, вычисленной Н. И. Глебовой (ИТА АН СССР) по теории DE200/LE200 для моментов верхней кульминации в Ташкенте. Положения Меркурия взяты после введения фазовых поправок различных форм, которые определялись по формулам (1), (3)—(7) и данным табл. 1. Для одних и тех же углов i, Θ и радиуса r фазовые поправки, вычисленные по разным формам, значительно отличаются друг от друга [6]. Такие же различия будут иметь соответ-

Таблица 1. Значения коэффициентов $k(i, \Theta)$ и $k'(i, \Theta)$ для вычислений фазовых поправок $\Delta\alpha_S$ и $\Delta\delta_S$

i , град	$k(i, \Theta) \cdot 1000$									
	Θ , град									
	0 180	10 170	20 160	30 150	40 140	50 130	60 120	70 110	80 100	90
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	1	1	1	1	2	2	2	2
10	0	1	3	4	4	5	6	6	6	6
20	0	5	10	14	18	21	22	23	24	24
30	0	12	22	32	40	46	50	52	53	53
40	0	20	39	56	71	81	88	91	92	92
50	0	31	60	87	108	125	135	140	141	141
60	0	43	84	122	153	176	191	197	198	198
70	0	57	111	161	202	234	254	261	261	261
80	0	72	141	203	257	298	323	331	331	331
90	0	87	170	247	313	365	398	404	404	404
100	0	102	200	291	370	434	475	480	480	480
110	0	117	229	334	426	502	553	557	557	557
120	0	130	256	374	479	566	628	635	635	635
130	0	142	281	410	526	625	694	711	711	711
140	0	153	302	441	567	674	750	780	783	783
150	0	162	319	466	600	712	793	830	843	847
160	0	168	332	485	623	742	823	864	881	886
170	0	172	330	496	638	759	840	884	902	908
175	0	173	341	499	642	764	844	888	908	913
179	0	180	342	500	643	765	846	890	909	915

i , град	$k'(i, \Theta) \cdot 1000$									
	Θ , град									
	90	80 100	70 110	60 120	50 130	40 140	30 150	20 160	10 170	0 180
90	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
80	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
70	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
60	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Таблица 2. Результаты сравнения прямых восхождений Меркурия с эфемеридой без учета и с учетом различных форм фазовых поправок

Вид учета фазовых поправок	Элонгация		W — E (скачок)	u^2	η	ε
	W	E				
$(O-C)$	+0.090 ^s	-0.069 ^s	+0.159 ^s	0.012 861	0.90	$\pm 0.074^s$
$(O-C) + \Delta\alpha_l$	+0.034	-0.014	+0.048	0.001 352	0.79	± 0.047
$(O-C) + \Delta\alpha_n$	+0.023	-0.007	+0.030	0.000 578	0.65	± 0.038
$(O-C) + \Delta\alpha_S$	+0.021	-0.007	+0.028	0.000 490	0.58	± 0.036
$(O-C) + \Delta\alpha_r$	-0.031	+0.049	-0.080	0.003 362	0.43	± 0.032
$(O-C) + \Delta\alpha_o$	-0.010	+0.028	-0.038	0.000 884	0.51	± 0.033
$(O-C) + \Delta\alpha_{Is}$	-0.005	+0.023	-0.028	0.000 554	0.55	± 0.034

ствующие значения $(O-C) + \Delta\alpha$. В связи с этим полученные нами значения $(O-C) + \Delta\alpha$ для разных фазовых поправок исследовались на систематическую ошибку, зависящую от фазы. Связь между ними устанавливалась по криволинейному корреляционному отношению η , равному единице при наличии строгой функциональной зависимости между переменными и нулю — при отсутствии связи [10]. Результаты приведены в табл. 2, где ε — средняя квадратичная ошибка одного $(O-C) + \Delta\alpha$ с учетом скачка, $u^2 = W^2 + E^2$. По данным табл. 2 можно заключить, что для всех шести способов учета поправок за фазу отмечается существенный скачок между средним значением $(O-C) + \Delta\alpha$ при W и E, причем

для поправок вида $\Delta\alpha_i$, $\Delta\alpha_n$ и $\Delta\alpha_s$, полученных из геометрических соображений, он положительный, а для поправок вида $\Delta\alpha_r$, $\Delta\alpha_{is}$ и $\Delta\alpha_o$, полученных по законам для идеальных рассеивателей,— отрицательный. Также заключаем, что ни один из способов учета поправок за фазу полностью не снимает систематической ошибки, связанной с введением поправки ($\eta \geq 0.43$). Эти результаты согласуются с исследованиями М. Л. Свешникова [7], в которых анализировались наблюдения Меркурия, выполненные в Морской обсерватории США в 1925—1941 гг. (поправки $\Delta\alpha_i$ и $\Delta\alpha_s$ им не изучались). Геометрический метод нахождения фазовой поправки $\Delta\alpha_i$ рассчитан на наблюдения по двум краям, а не по световому центру, и при больших фазовых углах он дает плохие результаты. Следовательно, при наблюдениях Меркурия по световому центру учет поправок этим методом некорректен. Из рассмотренных шести методов наиболее корректными можно считать методы, основанные на поправках вида $\Delta\alpha_o$, $\Delta\alpha_{is}$ и $\Delta\alpha_s$, хотя законы, которым отвечают поправки $\Delta\alpha_o$ и $\Delta\alpha_{is}$, не полностью согласуются с результатами фотометрии поверхности Меркурия [4]. Поэтому их значения получились больше требуемых, что и следовало ожидать.

Автор выражает глубокую признательность И. М. Бородинскому за внимание к работе и советы, а также Н. И. Глебовой за помощь в вычислениях эфемерид.

1. *Астрономический ежегодник СССР на 1986 год* / Под ред. В. К. Абалакина.— Л.: Наука, 1984.—691 с.
2. *Бронникова Н. М., Киселев А. А.* Фотографические позиционные наблюдения Венеры на 26" рефракторе в Пулкове в 1972 г. // Изв. Глав. астроном. обсерватории в Пулкове.— 1975.—193.—С. 153—157.
3. *Горель Г. К.* Некоторые замечания к формулам учета фазы при наблюдениях планет // Там же.— 1977.—195.—С. 43—45.
4. *Де Воккер Ж.* Фотометрия поверхности планет // Планеты и спутники / Под ред. В. Г. Курта.— М.: Мир, 1974.—С. 267—367.
5. *Киселева Т. П.* Позиционные фотографические наблюдения Венеры на двойном короткофокусном астрографе в Пулкове в 1972 г. // Изв. Глав. астроном. обсерватории в Пулкове.— 1975.—193.—С. 158—161.
6. *Онегина А. Б.* Определение положений больших планет фотографическим методом.— Киев: Наук. думка, 1981.—122 с.
7. *Свешников М. Л.* О вычислении поправок за фазу в планетных наблюдениях // Бюл. Ин-та теорет. астроном. АН СССР.— 1978.—14, № 5(158).—С. 294—300.
8. *Свешникова М. Л.* Определение ориентации FK4 по Вашингтонским наблюдениям Венеры // Проблемы астрометрии.— М.: Изд-во Моск. ун-та, 1984.—С. 122—126.
9. *Харин А. С., Миняйло Н. Ф.* О влиянии систематических ошибок при улучшении элементов орбиты и нуль-пунктов опорного каталога // Там же.—С. 118—122.
10. *Щиголов Б. М.* Математическая обработка наблюдений.— М.: Наука, 1969.—344 с.
11. *Eichelberger W. S.* Reduction tables for transit circle observation // *Publs U. S. Nav. Observ.*— 1906.—4.—P. E26—E27.
12. *Explanatory supplement to the Astronomical Ephemeris and the American Ephemeris and Nautical Almanac.*— London: Stationery office, 1961.—505 p.
13. *Newcomb S.* The elements of the four inner planets and the fundamental constants of astronomy.— Washington, 1895.

Астрон. ин-т АН УзССР,
Ташкент

Поступила в редакцию 23.03.87,
после доработки 22.07.87