

В. В. КИРИЧУК

## К ВОПРОСУ ВЛИЯНИЯ ЛИЧНОЙ ОШИБКИ НА ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ СОЛНЦА

Чтобы исследовать изменяемость личной ошибки наблюдателя при определениях времени вследствие изменения внешних условий наблюдений, нами были организованы определения времени и долготы по измеренным зенитным расстояниям Солнца. Выбор Солнца в качестве объекта наблюдений обусловлен предположением о существовании различий во внешних условиях наблюдений прохождений краев его диска через среднюю нить инструмента, до и после прохождения центра Солнца через нить при одном и том же круге инструмента.

Методика определения времени по Солнцу изложена в [3], и мы сочли возможным опустить описание этих этапов нашей работы. Наблюдения производились в течение двух полевых сезонов одним исполнителем на двух разных пунктах с помощью оптических теодолитов ОТ-02 и морских средних хронометров. Так, летом 1967 г. все наблюдения выполнены на пункте А (ОТ-02 № 11550, хронометр № 6767), а летом 1968 г. на пункте Б (ОТ-02 № 9674, хронометр № 6806). Фиксация моментов времени прохождения Солнца через нить инструмента производилась способом глаз—ухо.

Программа наблюдений одного вечера была принята следующая:

1. Прием ритмических сигналов времени на средний хронометр.
2. Определение поправки хронометра по измеренным зенитным расстояниям Солнца (три приема).
3. Прием ритмических сигналов времени на хронометр.

Интервал времени между приемами сигналов составлял обычно один час.

Обозначим  $U_{\odot}$  — поправку хронометра, вычисленную по наблюдениям касания диска Солнца со средней горизонтальной нитью инструмента до прохождения диска Солнца через нее. А  $U_{\ominus}$  — поправку хронометра, вычисленную по наблюдениям касания диска Солнца с нитью после прохождения его диска через нее (при одном и том же круге инструмента). Тогда разность между ними можно вычислить по формуле:

$$\Delta = U_{\odot} - U_{\ominus}. \quad (1)$$

Разности (1) вычислялись для каждого из трех приемов ежедневной программы, так что значение разности (1) для данного дня наблюдений получили как среднеарифметическое

$$\Delta = \frac{\sum \Delta_i}{3}. \quad (2)$$

## Результаты наблюдений сезона 1967 года

Дата	Z	$\Delta_i,^s$	$\Delta,^s$	Дата	Z	$\Delta_i,^s$	$\Delta,^s$
7. VI	68°59'	+0,85	+0,80	1. VII	67°18'	+1,13	+0,90
	70°43'	+0,33			69°00'	+0,81	
	72°24'	+0,61			72°47'	+0,76	
12. VI	69°24'	+1,95	+1,71	2. VII	66°36'	+0,42	+0,53
	71°46'	+1,37			68°15'	+0,80	
	73°00'	+1,80			71°32'	+0,36	
19. VI	74°08'	+1,28	+1,30	19. VII	69°40'	+0,98	+1,37
	75°41'	+1,60			71°37'	+1,70	
	80°13'	+1,20			74°00'	+1,42	
20. VI	72°38'	+0,75	+1,04	20. VII	70°34'	+1,10	+1,36
	74°00'	+1,30			72°18'	+1,62	
	75°55'	+1,07			73°57'	+1,37	
23. VI	73°02'	+1,40	+1,40	21. VII	67°40'	+0,71	+1,12
	75°00'	+1,10			69°40'	+1,26	
	76°30'	+1,70			72°13'	+1,38	
24. VI	72°20'	+1,20	+1,47	28. VII	77°48'	+0,74	+0,85
	73°40'	+1,70			80°27'	+0,92	
	75°37'	+1,50			82°20'	+0,90	
25. VI	72°57'	+2,12	+1,79	1. VIII	71°18'	+0,75	+0,99
	74°11'	+1,78			73°00'	+1,40	
	76°07'	+1,48			74°47'	+0,81	
26. VI	63°08'	+0,90	+0,55	1. VIII	67°41'	+1,71	+2,10
	65°00'	+0,45			69°11'	+2,12	
	68°13'	+0,31			72°13'	+2,46	
27. VI	72°24'	+0,20	+0,61	5 VIII	71°42'	+2,46	+2,07
	74°41'	+0,90			74°00'	+2,13	
	76°23'	+0,73			75°51'	+1,62	
29. VI	72°40'	+0,77	+0,79	7. VIII	66°42'	+2,01	+1,83
	74°18'	+0,57			68°34'	+1,82	
	77°07'	+1,03			71°01'	+1,66	

Оценка точности определения величины  $\Delta$  из трех приемов для каждого дня наблюдений производилась по формуле:

$$m = \pm \sqrt{\frac{\sum \delta^2}{6}}, \quad (3)$$

где  $\delta = \Delta_i - \Delta$ ;  $n(n-1) = 6$ , где  $n$  — число приемов. По нашим данным, величина средней квадратической ошибки для обоих сезонов лежит в пределах:  $\pm 0,1 - \pm 0,2_s$ , что в целом согласуется с точностью определения поправки хронометра данным способом. Значения величин  $\Delta_i$ , а также среднее значение зенитного расстояния Солнца для каждого приема приведены в табл. 1 и 2. Проанализировав данные, помещенные в этих таблицах, можно сделать следующие выводы:

1. Значения величин  $\Delta_i$  значительно превышают случайные ошибки фиксации времени прохождения Солнца через нить инструмента. В среднем для наблюдений 1967 г.  $\Delta = +1,25_s$ , а 1968 г.  $+1,39_s$  при величине случайной ошибки в отсчете по хронометру  $0,1 - 0,2_s$ .

## Результаты наблюдений сезона 1968 года

Дата	Z	$\Delta_i, ^\circ$	$\Delta, ^\circ$	Дата	Z	$\Delta_i, ^\circ$	$\Delta, ^\circ$
22. VI	68°27' 69°13' 70°48'	+1,42 +1,71 +1,18	+1,44	24. VII	72°33' 74°29' 77°13'	+1,78 +2,24 +1,93	+1,98
23. VI	74°54' 77°00' 78°51'	+1,90 +2,13 +1,60	+1,88	1. VII	70°50' 72°12' 75°02'	+2,10 +2,61 +1,85	+2,19
26. VI	71°13' 73°00' 75°10'	+2,01 +1,72 +2,31	+2,01	5. VIII	75°09' 76°59' 79°03'	+1,43 +1,73 +1,25	+1,47
1. VII	64°23' 66°01' 69°43'	+0,41 +1,10 +0,64	+0,72	6. VIII	69°10' 71°24' 73°03'	+0,30 +0,70 +0,52	+0,50
4. VII	68°42' 71°05' 73°24'	+1,98 +1,41 +1,18	+1,52	7. VIII	70°39' 72°14' 74°00'	+1,60 +1,32 +1,91	+1,61
6. VII	75°52' 78°00' 79°59'	+0,32 +0,81 +0,83	+0,65	9. VIII	69°54' 72°14' 74°29'	+0,01 +0,73 +0,83	+0,52
8. VII	69°33' 71°28' 75°01'	+1,74 +2,41 +2,12	+2,09	10. VIII	72°36' 75°00' 76°59'	+2,10 +2,26 +1,68	+2,01
10. VII	73°16' 75°12' 76°58'	+0,71 +0,91 +1,18	+0,93	12. VIII	78°36' 80°58' 83°00'	+0,71 +0,98 +1,65	+1,11
14. VII	73°02' 75°13' 76°51'	+1,72 +1,32 +1,14	+1,39	13. VIII	69°55' 71°36' 74°00'	+1,71 +0,99 +1,13	+1,28
16. VII	72°28' 74°17' 76°22'	+1,90 +1,62 +1,84	+1,79	15. VIII	71°48' 73°37' 75°26'	+0,80 +0,91 +0,46	+0,72

2. Разности  $\Delta$  в течение всего периода наблюдений обоих сезонов сохраняют один и тот же знак плюс.

3. Изменения величин  $\Delta$  в период наблюдений одного вечера обусловлены случайными ошибками фиксации времени по хронометру.

4. Колебания величин  $\Delta$  внутри каждого сезона, равные в 1967 г.  $\Delta_{\max} - \Delta_{\min} = 1,57^s$  и 1968 г.  $1,69^s$ , значительно превышают случайные ошибки в отсчетах времени.

5. Поскольку среднее значение разности (1) для наблюдений 1967 г.

$$(\Delta = +1,25^s \pm 0,12^s)$$

и наблюдений 1968 г. ( $\Delta = +1,39^s \pm 0,13^s$ ) близки по величине и одинаковы по знаку, то можно утверждать, что разности  $\Delta$  носят систематический характер.

Мы считаем, что это явление (систематическое расхождение между значениями поправок хронометра, определяемых по измеренным зенитным расстояниям Солнца в моменты касания диска Солнца с нитью

инструмента до и после прохождения центра Солнца через нить) может быть объяснено влиянием следующих факторов:

1. Систематической ошибкой, допускаемой при вычислении зенитных расстояний центра Солнца, из-за неучета деформации видимого диска Солнца под воздействием рефракции и неучета толщины средней горизонтальной нити инструмента.

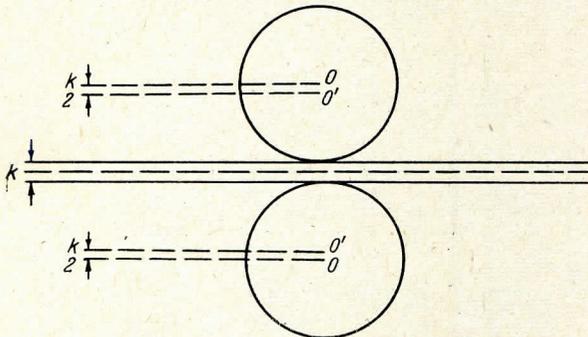


Рис. 1. Влияние толщины средней горизонтальной нити инструмента на вычисление зенитного расстояния центра диска Солнца.

2. Изменением личной ошибки наблюдателя при фиксации времени касания диска Солнца с нитью инструмента.

Рассмотрим влияние первого фактора (рис. 1, 2).

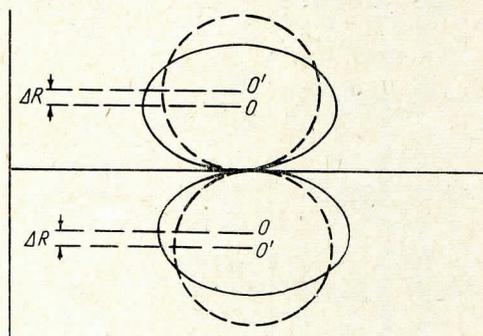


Рис. 2. Влияние рефракционной деформации видимого диска Солнца на вычисление зенитного расстояния его центра (вертикальная стрелка указывает направление видимого движения Солнца).

Из рисунков хорошо видно, что зенитное расстояние центра Солнца должно вычисляться по следующим формулам:

$$Z = Z_{\odot} - R + \Delta R - \frac{1}{2} k, \quad Z = Z_{\ominus} + R - \Delta R + \frac{1}{2} k, \quad (4)$$

где  $Z_{\odot}$  и  $Z_{\ominus}$  — измеренные зенитные расстояния краев диска Солнца,  $\Delta R = \frac{\rho_0 \cdot R \cdot \sin 1''}{\cos^2 Z}$  (4') — деформация диска Солнца под влиянием рефракции [1], а  $k$  — толщина нити инструмента, определяемая из исследований [3]. А поскольку  $t = f(Z)$ , то мы вправе записать, что

$$t_{\odot} = t_{\oplus} + \Delta t'_{\odot} - \Delta t''_{\odot}, \quad t_{\ominus} = t_{\ominus} - \Delta t'_{\ominus} + \Delta t''_{\ominus}, \quad (5)$$

где  $t_{\odot}$  — истинный часовой угол центра Солнца,  $t_{\oplus}$  и  $t_{\ominus}$  — часовые углы центра Солнца, вычисленные без учета влияния деформации диска от рефракции и без учета толщины нити, а

$$\Delta t'_{\odot} = \frac{\Delta R}{15 \cos \varphi \cdot \sin A} \quad \text{и} \quad \Delta t''_{\odot} = \frac{k}{30 \cos \varphi \cdot \sin A}. \quad (6)$$

Полагая в (4) и (6)  $\varphi = 49^\circ 50'$ ,  $A = 90^\circ$ ,  $\rho_0 = 60''$ ,  $R = 16' = 960''$  и  $Z = 72^\circ$  и учитывая, что по результатам исследований  $k = 3$ , получаем:

$$\Delta t'_{\odot} = 0,3^s; \quad \Delta t''_{\odot} = 0,2^s.$$

Известно, что

$$U = m_c - T = t_{\odot} - (T_{\odot} + hv) - T. \quad (7)$$

Следовательно, влияние рассматриваемых факторов на значения поправок хронометра, вычисленных по наблюдениям прохождений краев диска Солнца через среднюю нить, можно представить следующим образом:

$$U_{\odot} - U_{\odot} = 2\Delta t'_{\odot} - 2\Delta t''_{\odot} = 0,2^s. \quad (8)$$

Сравнивая фактические значения разностей (1) со значением, получаемым по (8), приходим к выводу, что в нашем случае суммарное влияние деформации диска Солнца и толщины нити на определение поправок хронометра близко к нулю и наличие систематической разницы между значениями поправок хронометра, вычисляемых по двум положениям Солнца относительно средней нити инструмента, нельзя объяснить их воздействием на часовой угол Солнца.

Рассмотрим влияние изменения личной ошибки наблюдателя на определение поправки хронометра при наблюдениях Солнца. Как известно, фиксация моментов прохождений светил через нить инструмента производится с некоторой ошибкой  $\Delta T$ , которая в свою очередь состоит из двух: случайной и систематической. Под личной ошибкой, свойственной каждому наблюдателю, понимают именно систематическую часть величины  $\Delta T$ , которая входит во все отсчеты по хронометру с одним и тем же знаком и не компенсируется при увеличении числа наблюдений. Личная ошибка зависит от ряда факторов, из которых следует отметить такие: а) внешние условия наблюдений (объект наблюдений, освещенность, скорость движения объекта в поле зрения трубы, метеофакторы и т. д.); б) инструменты, применяемые при наблюдениях (увеличение трубы, толщина нитей, порядок хронометра и другие инструментальные характеристики); в) психофизиологическое состояние наблюдателя. С изменением указанных факторов меняется и личная ошибка наблюдателя, что отмечено многими исследователями [4]. Дадим характеристику каждого из трех факторов, вызывающих личную ошибку, применительно к нашим наблюдениям.

#### ВЛИЯНИЕ ПСИХОФИЗИОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ НАБЛЮДАТЕЛЯ НА ВЕЛИЧИНУ ЛИЧНОЙ ОШИБКИ

Как уже указывалось, максимальная продолжительность наблюдений одного вечера составляла один час. За столь короткий промежуток времени трудно ожидать изменения психофизиологического состояния наблюдателя, и значит влияние этого фактора на величину личной ошибки можно считать постоянным для отдельного вечера. Но изо дня в день в течение всего сезона работ психофизиологическое состояние наблюдателя несомненно меняется, что вызывает в свою очередь изменение личной ошибки. Очевидно, что среднее значение личной ошибки наблюдателя, выведенное по значениям ее в течение сезона, представляет собой результат влияния некоего среднего психофизиологического состояния наблюдателя, присущего последнему как личности. Поэтому от сезона к сезону средняя личная ошибка, обусловленная только данным фактором, не должна изменяться скачкообразно без видимых изменений психофизиологического комплекса, присущего данному наблюдателю.

## ВЛИЯНИЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НА ВЕЛИЧИНУ ЛИЧНОЙ ОШИБКИ

Поскольку при всех наблюдениях одного сезона применялись одни и те же инструменты, следует ожидать, что личная ошибка в течение сезона, вызываемая характеристиками данных инструментов, должна быть постоянной. При наблюдениях на другом комплекте инструментов того же типа возможно изменение личной ошибки, поскольку даже однотипные инструменты имеют разные инструментальные характеристики. Следовательно, значения личной ошибки для двух сезонов могут отличаться друг от друга по этой причине.

### ВЛИЯНИЕ ВНЕШНИХ УСЛОВИЙ НА ВЕЛИЧИНУ ЛИЧНОЙ ОШИБКИ

Запишем следующие равенства:

$$U_{\odot} = m_c - (T_{\odot} + \Delta T_1), \quad U_{\ominus} = m_c - (T_{\ominus} + \Delta T_2), \quad (9)$$

где  $T_{\odot}$  и  $T_{\ominus}$  — отсчеты по хронометру в момент касания диска Солнца со средней нитью инструмента до и после прохождения его центра через нить;  $\Delta T_1$  и  $\Delta T_2$  — личные ошибки наблюдателя в первом и втором случаях; мы предполагаем, что  $\Delta T_1 \neq \Delta T_2$ , а это значит, что личная ошибка наблюдателя меняется.

Тогда формула (1) записывается в виде:

$$\Delta = U_{\odot} - U_{\ominus} = \Delta T_2 - \Delta T_1. \quad (10)$$

Другими словами, разность поправок хронометра  $U_{\odot}$  и  $U_{\ominus}$  равняется изменению личной ошибки наблюдателя. Как ни противоречит этот вывод о столь быстром изменении величины личной ошибки наблюдателя ее свойствам, изложенным выше, все же он обоснован. Что же отличает внешние условия наблюдения касания нижнего (верхнего) края диска Солнца с нитью до и после прохождения его центра через нить инструмента? Эти различия условий наблюдений могут быть разделены на две группы:

1. Различие изменений условий освещенности средней нити инструмента. Если в первом случае освещенность нити усиливается по мере приближения Солнца к центру поля зрения трубы и достигает максимума в момент касания, то во втором случае освещенность нити, будучи максимальной во время прохождения через нее Солнца, затем уменьшается, достигая минимума в момент касания. Мы специально отметили в заголовке статьи, что имеется в виду различие в изменении освещенности, а не различие в ее интенсивности. Интенсивность освещения в обоих случаях будет одна и та же, но обратный знак изменения ее безусловно, окажет влияние на сетчатку глаза наблюдателя и вызовет изменение его личной ошибки, причем поскольку подобное явление присуще всем наблюдениям в одинаковой степени, то изменение личной ошибки под его воздействием носит систематический характер.

2. Различие в изменении направления видимого движения Солнца относительно средней нити инструмента. Фиксация времени в первом случае производится в момент, когда Солнце, касаясь нити, еще не пересекло ее, а во втором — когда Солнце, касаясь нити, еще не оторвалось от нее. Эта объективно существующая разница в ощущениях наблюдателя, вызванная изменением направления видимого движения центра Солнца — к нити и от нее — обусловит различие в реакции наблюдателя в обоих случаях, что вызовет изменение его личной ошибки

Для выяснения характера изменения личной ошибки наблюдателя мы вычислили значения долгот пунктов А и Б отдельно по значениям поправок хронометра  $U_{\odot}$  и  $U_{\ominus}$  и вывели средние значения долготы каждого пункта. Оказалось, что для наблюдений 1967 г. (пункт А)

$$|\lambda_{\ominus A} - \lambda_{\odot A}| = 1,2^s = \Delta, \quad (11)$$

для наблюдений 1968 г. (пункт Б)

$$|\lambda_{\ominus A} - \lambda_{\odot A}| = 1,4^s = \Delta. \quad (12)$$

Если же вычислить значения долгот пунктов по средней величине поправки хронометра

$$U = \frac{1}{2} (U_{\ominus} + U_{\odot}), \quad (13)$$

то

$$|\lambda_{\ominus} - \lambda| = |\lambda_{\odot} - \lambda| = \left| \frac{\Delta}{2} \right|. \quad (14)$$

При этом долготы, найденные по поправкам хронометра (13), в пределах точности определения времени по Солнцу оказались равными истинным значениям долгот, определенным из астрономических наблюдений первого класса, то есть

$$\lambda = \frac{1}{2} (\lambda_{\ominus} + \lambda_{\odot}) = \lambda_0 \pm m; \quad (15)$$

где  $\lambda_0$  — истинная долгота пункта,  $\lambda$  — долгота пункта, полученная по поправке хронометра (13),  $m$  — средняя квадратическая ошибка определения долготы пункта с помощью определения времени по Солнцу. Но равенство (15) означает, что значение долготы пункта, полученное из определений времени по наблюдениям Солнца, не зависит от личной ошибки наблюдателя, то есть при вычислении поправки хронометра по формуле (13) личная ошибка наблюдателя при фиксации момента прохождения Солнца через нить инструмента исключается. А это возможно в том случае, когда величины  $\Delta T_1$  и  $\Delta T_2$  в формулах (9) и (10) равны по величине и обратны по знаку, то есть

$$\Delta T_1 = -\Delta T_2.$$

Тогда

$$|\Delta| = |2\Delta T_1| = |2\Delta T_2|. \quad (16)$$

Значит, величины  $\Delta$ , определяемые формулой (1), представляют собой удвоенную личную ошибку наблюдателя и должны обладать ее свойствами. Анализ величин  $\Delta$ , помещенных в табл. 1 и 2, подтверждает этот вывод. Действительно, величины  $\Delta$ , подобно личной ошибке наблюдателя, а) сохраняют постоянство по величине и знаку за время наблюдений одного вечера; б) изменяют величину в течение сезона работ, колеблясь около некоторого среднего значения, характерного для данного наблюдателя; в) сохраняют постоянство среднего значения от сезона к сезону.

Таким образом, можно утверждать, что:

1. Фиксация времени касания краев диска Солнца со средней нитью инструмента — до и после прохождения центра Солнца через нить — производится с систематическими ошибками, равными по величине и обратными по знаку.

2. Разность между значениями поправок хронометра, определенными по наблюдениям касания краев диска Солнца с нитью, до и после прохождения его центра через нее, представляет собой удвоенную личную ошибку наблюдателя.

3. При наблюдениях Солнца по этим двум значениям поправок хронометра может быть определено значение личной ошибки (личного уравнения) наблюдателя для каждого данного момента.

4. Изменение знака личной ошибки наблюдателя при сохранении ее абсолютной величины, при фиксации времени касания диска Солнца до и после прохождения его центра через нить, вызывается объективным существованием различием внешних условий наблюдений, воздействующих на ощущения наблюдателя.

Итак, при наблюдениях Солнца личная ошибка наблюдателя не влияет на точность определения времени и долготы, но о ее величине и введении в процессе работ можно судить по разности значений поправок хронометра, определенных при двух положениях центра Солнца относительно средней нити инструмента.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Загребин Д. В. Введение в астрометрию. «Наука», М.—Л., 1966.
2. Изотов А. А., Пеллинен Л. А. Исследования земной рефракции и методов геодезического нивелирования. Труды ЦНИИГАиК, вып. 102, Госгеолтехиздат, 1955.
3. Цветков К. А. Практическая астрономия. Геодезиздат, М., 1951.
4. Bessel F. W. Persönliche Gleichung bei Durchgangsbeobachtungen, Königsbergische Beobachtungen, 8, 1823.

Работа поступила  
20 августа 1969 г.