

В. В. КИРИЧУК

ОБ ОДНОЙ ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИИ АСТРОНОМИЧЕСКОЙ РЕФРАКЦИИ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ СОЛНЦА

Как известно, определение действительных значений астрономической рефракции сводится к определению двух зенитных расстояний светила — измеренного и вычисленного (теоретического). Поэтому

$$\rho = Z_{\text{теор}} - Z_{\text{измер.}} \quad (1)$$

Теоретическое зенитное расстояние светила является функцией его часового угла

$$\cos Z = \sin \varphi \cdot \sin \delta + \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos t, \quad (2)$$

где $t = T + u - a$.

При исследованиях аномалий астрономической рефракции на малых высотах ($2; 1; 0^\circ$) наиболее удобным объектом наблюдений является Солнце, поэтому часовой угол представим формулой

$$t_{\odot} = T + u + (T_{\odot} + h \cdot v), \quad (3)$$

где $(T_{\odot} + h \cdot v)$ — уравнение времени в момент наблюдений [1].

Поскольку видимый диаметр Солнца составляет около $32'$, то можно получать два значения астрономической рефракции для каждого выбранного зенитного расстояния ($88; 89; 90^\circ$) по наблюдениям прохождений нижнего и верхнего краев диска Солнца через эти высоты. При этом, казалось бы, мы должны были бы получать идентичные значения астрономической рефракции (предполагается, что в результаты измерений и вычислений введены все необходимые поправки: за место зенита, за суточный параллакс Солнца, за радиус Солнца). Однако, как показано в [2], при фиксации времени прохождений нижнего и верхнего краев диска Солнца личная ошибка наблюдателя меняет свой знак, оставаясь постоянной по абсолютной величине.

Обозначим измеренные моменты прохождений нижнего и верхнего краев диска Солнца через общий альмукутантат соответственно T'_{\odot} и T_{\odot} (пусть Солнце наблюдается на западе). Тогда истинные моменты прохождений будут такие [2]:

$$\left. \begin{aligned} T_{\odot} &= T'_{\odot} + |\delta T|; \\ T_{\odot} &= T'_{\odot} - |\delta T|, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где $|\delta T|$ — абсолютная величина личной ошибки, определяемая по методике, изложенной в [2].

В наших исследованиях [2] было показано, что истинный момент прохождений нижнего края диска Солнца всегда меньше измеренного, а истинный момент прохождений верхнего края диска Солнца всегда

больше измеренного на величину личной ошибки наблюдателя. Такое же, очевидно, влияние личной ошибки наблюдателя и на вычисление часовых углов Солнца в обоих случаях:

$$\left. \begin{aligned} t_{\odot} &= T'_{\odot} + u + (T_{\odot} + h \cdot v) + |\delta T| = t'_{\odot} + |\delta T|; \\ t_{\ominus} &= T'_{\ominus} + u + (T_{\ominus} + h \cdot v) - |\delta T| = t'_{\ominus} - |\delta T|; \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где t_{\odot} и t_{\ominus} — часовые углы Солнца, вычисленные соответственно по моментам прохождений нижнего и верхнего краев диска Солнца.

Запишем уравнения (2) и (3) в виде

$$\left. \begin{aligned} Z_{\odot} &= f(t'_{\odot}; \varphi); \\ Z_{\ominus} &= f(t'_{\ominus}; \varphi). \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Тогда, принимая во внимание (5), для истинных зенитных расстояний Солнца получаем следующие равенства:

$$\left. \begin{aligned} Z_{\odot} &= f[(t'_{\odot} + |\delta T|); \varphi]; \\ Z_{\ominus} &= f[(t'_{\ominus} - |\delta T|); \varphi]. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Разлагая (7) в ряд и ограничиваясь первыми членами разложения, находим

$$\left. \begin{aligned} Z_{\odot} &= f(t'_{\odot}; \varphi) + f'(t'_{\odot}; \varphi) \cdot |\delta T|; \\ Z_{\ominus} &= f(t'_{\ominus}; \varphi) - f'(t'_{\ominus}; \varphi) \cdot |\delta T|. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Принимая во внимание (6) и вычитая из второго уравнения (8) первое, записываем

$$Z_{\ominus} - Z_{\odot} = (Z'_{\ominus} - Z'_{\odot}) - 2f'(t'_{\odot}; \varphi) \cdot |\delta T|. \quad (9)$$

Ниже покажем вид функции f' и используем полученное уравнение для вывода поправки в значение астрономической рефракции. Приведенные соотношения справедливы лишь в случае, когда зенитные расстояния верхнего и нижнего краев диска Солнца равны друг другу в моменты прохождений их через среднюю горизонтальную нить инструмента.

В наших исследованиях, проведенных в 1967—1968 гг., наблюдение Солнца осуществлялось по следующей методике. На вертикальном круге инструмента устанавливали отсчет, равный выбранному зенитному расстоянию (88; 89; 90°), фиксировали момент прохождения нижнего края диска Солнца и точно отсчитывали вертикальный круг. Затем трубу переводили через зенит, снова на вертикальном круге устанавливали отсчет, соответствующий тому же зенитному расстоянию, и производили аналогичное наблюдение прохождения теперь уже верхнего края диска Солнца. При такой методике, естественно, не удавалось выдержать абсолютно точного равенства друг другу зенитных расстояний, поскольку при установке отсчетов не учитывалось место зенита. Но, как показала практика наблюдений, обычно точность установок трубы на требуемое зенитное расстояние при разных положениях вертикального круга характеризуется величиной 0,5', то есть

$$Z'_{\odot} - Z'_{\ominus} \leq \pm 0,5', \quad (10)$$

где Z'_{\odot} — измеренное зенитное расстояние соответствующего края диска Солнца.

Измерение зенитных расстояний Солнца производилось с помощью оптического теодолита ОТ-02, а фиксация времени прохождений краев диска Солнца через среднюю горизонтальную нить инструмента осуществлялась с помощью среднего морского хронометра способом «глаз—ухо».

Тогда с учетом (10) соотношение между истинными (теоретическими) и измеренными зенитными расстояниями Солнца должно удовлетворять равенству

$$Z_{\odot}^{\prime} - Z_{\odot}^{\prime\prime} = Z_{\odot} - Z_{\odot} + \delta\rho, \quad (11)$$

где $\delta\rho$ — дифференциальное изменение астрономической рефракции при изменении зенитного расстояния на величину $Z_{\odot}^{\prime} - Z_{\odot}^{\prime\prime}$.

Подставляя (11) в (9) и производя простые преобразования с учетом (1), получаем

$$\rho_{\odot} - \rho_{\odot} = 2f'(t_{\odot}^{\prime}; \varphi) \cdot |\delta T| - \delta\rho, \quad (12)$$

или, учитывая, что производная от $\cos Z$ по t имеет вид

$$f'(t_{\odot}^{\prime}; \varphi) = 15 \cos \varphi \cdot \sin A, \quad (13)$$

и обозначая

$$30 \cos \varphi \cdot \sin A \cdot |\delta T| = \delta Z, \quad (14)$$

окончательно находим

$$\rho_{\odot} - \rho_{\odot} = \delta Z - \delta\rho. \quad (15)$$

Равенство (15) показывает, что значения астрономической рефракции, полученные по наблюдениям прохождений верхнего и нижнего краев диска Солнца через общий альмукантарат, отличаются между собой на алгебраическую разность между величиной δZ , обусловленной изменением личной ошибки наблюдателя, и величиной, вызванной неравенством зенитных расстояний при наблюдениях Солнца при разных кругах инструмента.

Для подтверждения наших выводов следовало сравнить фактические значения $\rho_{\odot} - \rho_{\odot}$ полученные из наблюдений, со значениями $\rho_{\odot} - \rho_{\odot}$, предвычисленными по формуле (15).

Программа наблюдений была составлена таким образом, чтобы обеспечить получение всех данных, необходимых для этого сравнения. Каждый день производили следующие измерения: 1) определяли время по приему ритмических сигналов, а также 2) время по зенитным расстояниям Солнца для нахождения личной ошибки наблюдателя; 3) считывали время по приему ритмических сигналов; 4) наблюдали прохождение краев диска Солнца через альмукантараты 88; 89; 90°, 5) в заключение определяли время по приему ритмических сигналов.

Ниже в таблице приведены для сравнения фактические и предвычисленные значения $\rho_{\odot} - \rho_{\odot}$. В таблице даны значения $2\delta T$, которые определялись как разность между значениями поправок хронометра, полученных по наблюдениям касания краев диска Солнца с нитью до и после прохождения его центра через нее, что соответствует, как показано в [2], удвоенной личной ошибке наблюдателя.

Анализируя данные, помещенные в таблице, можно сделать следующие выводы.

а) Для зенитных расстояний 88 и 89° экспериментально подтверждается заключение о систематическом расхождении между значениями астрономической рефракции, полученными по наблюдениям прохождений верхнего и нижнего краев диска Солнца через каждый из выбранных альмукантаратов, обусловленном изменением личной ошибки наблюдателя.

б) Для этих расстояний среднее арифметическое значение астрономической рефракции из наблюдений верхнего и нижнего краев диска Солнца не зависит от личной ошибки наблюдателя.

Фактические и предвычисленные значения $\rho_{\odot} - \rho_{\ominus}$

$Z = 88^{\circ}$			$Z = 89^{\circ}$			$Z = 90^{\circ}$		
$(\rho_{\odot} - \rho_{\ominus})_{\text{ф}}$	$2 \delta T$	$(\rho_{\odot} - \rho_{\ominus})_{\text{пр}}$	$(\rho_{\odot} - \rho_{\ominus})_{\text{ф}}$	$2 \delta T$	$(\rho_{\odot} - \rho_{\ominus})_{\text{пр}}$	$(\rho_{\odot} - \rho_{\ominus})_{\text{ф}}$	$2 \delta T$	$(\rho_{\odot} - \rho_{\ominus})_{\text{пр}}$
21,6"	2,30 ^s	22,0"	14,8"	2,30 ^s	16,7"	37,0"	2,30 ^s	29,4"
26,0	3,42	28,0	44,8	3,42	39,8	- 8,8	3,42	20,4
10,5	1,45	10,5	19,3	1,45	15,7	27,7	1,45	17,0
8,7	1,42	9,2	16,7	1,42	17,0	-13,7	1,42	15,0
10,7	1,82	12,2	29,3	1,60	24,0	41,9	1,82	20,0
3,9	1,52	10,0	20,0	1,82	17,0	47,6	1,65	22,6
14,1	1,65	13,8	29,4	1,52	25,3	37,3	1,98	25,2
-0,3	0,38	1,0	10,1	1,98	11,5	-11,1	0,38	8,0
25,7	2,25	20,0	16,7	2,25	18,8	25,5	1,18	3,9
20,1	1,18	11,5	6,6	1,18	10,2			
12,3	1,25	12,3	21,5	1,25	16,0			
Среднее значение								
12,3"	1,75 ^s	14,3" ± 2,0"	20,8"	1,84 ^s	18,0" ± 3,0"			

в) Если по метеорологическим условиям удастся отнаблюдать прохождение через выбранный альмукантарат только одного из краев диска Солнца, то в значение астрономической рефракции, вычисленное по этому наблюдению, для зенитных расстояний 88 и 89° необходимо ввести поправку по одной из формул:

$$\left. \begin{aligned} \rho_{\odot} + \frac{1}{2} \delta Z &= \rho_{\odot}; \\ \rho_{\ominus} - \frac{1}{2} \delta Z &= \rho_{\ominus}. \end{aligned} \right\} (16)$$

г) Для зенитных расстояний 90° фактические значения величин $\rho_{\odot} - \rho_{\ominus}$ значительно отличаются от предвычисленных и их распределение по величине и знаку носит в целом случайный характер. Это свидетельствует о том, что преобладающую роль в этом случае играют другие источники ошибок случайного характера (плохие условия видимости в горизонте, рефракционные искажения видимого диска Солнца, отсутствие четких границ диска Солнца и другие). Вследствие этого одиночные наблюдения одного из краев диска Солнца для определения астрономической рефракции на этой высоте ($h=0^{\circ}$) не могут быть использованы, так как введение поправки за личную ошибку наблюдателя теряет смысл из-за резкого колебания собственной ее величины, вызываемого ухудшением условий наблюдений Солнца в горизонте.

В заключение отметим такие основные положения.

1. Экспериментально выявленное систематическое расхождение между величинами астрономической рефракции вида (15) подтверждает сделанный ранее вывод об изменении личной ошибки наблюдателя при наблюдениях прохождений верхнего и нижнего краев диска Солнца.

2. Хорошая согласованность эмпирических и предвычисленных значений величин $\rho_{\odot} - \rho_{\ominus}$ для $Z \leq 89^{\circ}$ подтверждает правильность теоретического вывода формулы (15).

3. Каждое наблюдение одного из краев диска Солнца может быть использовано для самостоятельного вывода астрономической рефракции для данного зенитного расстояния ($Z \leq 89^\circ$) после введения в конечный результат поправки δZ по формулам (16). Это значительно увеличивает производительность работы по набору исходных данных для исследований рефракционных аномалий на малых высотах по наблюдениям Солнца.

4. Случайный характер распределения эмпирических значений величин $\rho_{\odot} - \rho_{\ominus}$ при наблюдениях Солнца в горизонте ($Z = 90^\circ$) свидетельствует о наличии причин случайного характера, искажающих результаты определений рефракции на этом зенитном расстоянии. Для увеличения надежности определения рефракции в этом случае необходимо использовать только парные наблюдения прохождений верхнего и нижнего краев диска Солнца через общий альмукантарат.

ЛИТЕРАТУРА

1. Блажко С. Н. Курс сферической астрономии. М., 1954.
2. Киричук В. В. К вопросу влияния личной ошибки на определение времени по наблюдениям Солнца. В сб. «Геодезия, картография и аэрофотосъемка», вып. 14. Изд-во Львовского ун-та, Львов, 1971.

Работа поступила
17 октября 1970 г.