

А. В. АРХАНГЕЛЬСКИЙ

О ТОЧНОСТИ ФОТОГРАФИЧЕСКОГО МЕТОДА ИССЛЕДОВАНИЙ АСТРОНОМИЧЕСКОЙ РЕФРАКЦИИ

Ранее [1] был предложен метод исследования рефракционных явлений по искажениям фотоизображений Солнца вблизи горизонта. Используя соотношение [1]

$$\Delta R_{\text{вер}} - \Delta R_{\text{вер}}^{\text{таб}} = (y'' - y') M, \quad (1)$$

где $M = \frac{R}{y}$ — масштаб фотоизображения, по результатам измерений фотографий диска Солнца определяется аномальная часть рефракционного солнечного диска. Здесь приняты следующие обозначения: y, y', y'' — соответственно теоретическая, наблюдаемая и табличная ординаты точек фотоизображения Солнца; $\Delta R_{\text{вер}}$ и $\Delta R_{\text{вер}}^{\text{таб}}$ — соответственно истинное и табличное рефракционное искажение солнечного диска; R — видимый угловой радиус Солнца, выбираемый из AE на момент наблюдения.

Не касаясь погрешностей оптической системы фотоустановки, рассмотрим вопрос о точности определения величины $\Delta R_{\text{вер}} - \Delta R_{\text{вер}}^{\text{таб}} = \delta\rho$.

На основании уравнения (1) можем записать

$$m_{\delta\rho}^2 = m^2 y' M^2 + m^2 y'' M^2 + (y'' - y')^2 m_M^2. \quad (2)$$

Остановимся на каждом из входящих в формулу (2) источников погрешностей в отдельности.

Ошибка определения масштаба изображения. Учитывая, что [1]

$$y = F \operatorname{tg} R, \quad (3)$$

для средней квадратической ошибки масштаба изображения получаем соотношение

$$m_M^2 = \frac{R^2}{y^2} m_y^2 = \frac{R^2}{y^2} m_F^2 \operatorname{tg}^2 R. \quad (4)$$

Определение входящей в формулу (4) величины y теоретической ординаты не представляет трудностей, ибо фактически она равна половине измеренного горизонтального (неискаженного рефракцией) диаметра фотоизображения Солнца.

Ошибка определения табличной ординаты фотоизображения Солнца. Пусть R и $\Delta R_{\text{таб}}$ — соответственно истинный радиус Солнца и его табличное рефракционное искажение, выраженное в миллиметрах. Тогда

$$y'' = (R - \Delta R_{\text{таб}}). \quad (5)$$

Отсюда

$$m_{y''}^2 = m_{\Delta R_{\text{таб}}}^2. \quad (6)$$

Табличное искажение $\Delta R_{\text{таб}}$ определяется как разность рефракций центра и края солнечного диска, то есть

$$\Delta R_{\text{таб}} = r_{\text{кр}} - r_0 \quad (7)$$

и, значит,

$$m_{\Delta R_{\text{таб}}}^2 = m_{r_{\text{кр}}}^2 + m_{r_0}^2 \cong 2 m_{r_0}^2, \quad (8)$$

где m_{r_0} — средняя квадратическая ошибка табличного значения астрономической рефракции на соответствующем зенитном расстоянии. Для таблиц рефракции ПАО эта величина составит

$$m_r^2 = \frac{4r^2}{\sin^2 2z} \cdot \frac{m_z^2}{\rho^2} + \frac{\lambda^2 r^2 m^2}{(1 + mt)^2} m_t^2 + \frac{A^2 r^2}{b^2} m_b^2, \quad (9)$$

где r — средняя рефракция; λ и A — постоянные, выбираемые из таблиц по зенитному расстоянию; t и b — температура и давление воздуха на высоте фотоустановки; m_z , m_t , m_b — средние квадратические ошибки зенитного расстояния, температуры и давления воздуха соответственно.

Ошибка измеренной ординаты фотоизображения Солнца. Вопрос о точности измерения ординат фотоизображения Солнца связан прежде всего с точностью используемого измерительного прибора, методикой измерений и качеством фотоизображения. Для его выяснения нами выполнены экспериментальные исследования на стереокомпараторе фирмы Цейсс по фотоснимкам Солнца, полученным на фотоустановке с $F = 1000$ мм.

Программа исследований была построена так, чтобы можно было выяснить влияние на точность измерения ординат следующих факторов: оптимальное количество наведений, различия условий наведения, кривизна участка фотоизображения, в котором выполняется наведение, качество фотоизображения и мертвый ход наводящих винтов прибора.

Прежде чем приводить количественные характеристики выполненных исследований остановимся на различии условий наведения марки измерительного прибора на определяемую точку фотоизображения.

Известно, что объективно существующее систематическое различие условий измерений может породить систематические различия в реакции наблюдателя в процессе измерения, и, как следствие, вызвать в результатах измерения систематическую лишнюю ошибку.

При обработке фотоизображений Солнца на любом измерительном приборе возможны два случая наведения марки на край фотоизображения: из прозрачной области фотопластинки на темный край изображения или из темной области изображения на границу раздела. Поэтому можно было ожидать наличие в этих условиях систематических ошибок наведения, что и послужило предметом исследований. Ниже показана зависимость m_y

от количества наведений:

Количество наведений	$m_{y'}$, мкм
2	± 9
4	± 9
6	± 5
7	± 5
8	± 5
10	± 5
12	± 5

от кривизны участка фотоизображения:

x^* , мм	$m_{y'}$, мкм
53,51	3,49
53,38	8,32
52,90	8,62
51,96	9,33
49,00	10,00

от условий наведения:

Условия наведения	$m_{y'}$, мкм
П—Т	$\pm 5,48$
Т—П *	$\pm 5,16$

Анализ данных, приведенных выше, позволяет сделать следующие выводы:

1. Оптимальное число наведений для измерения ординаты выбранной точки диска равно 6.

2. Среднеквадратическая ошибка измеренной ординаты зависит от кривизны фотоизображения диска Солнца, изменяясь в пределах от 3 до 10 мкм при переходе от измерений в экваториальной области к измерениям в полярной области диска. При оценке точности рабочих измерений снимка это обстоятельство следует учитывать с помощью эмпирической формулы, связывающей значения $m_{y'}$ с абсциссой точки наведения.

3. Ошибка измеренной ординаты не зависит от изменения условий наведения. Кроме того, дополнительно был проанализирован ряд разностей измеренных ординат вида (П—Т)—(Т—П) общим объемом $n=25$. Систематического различия в определении ординат не обнаружено в пределах точности измерительного прибора.

Исходя из изложенного выше, окончательно можно заключить, что для достижения точности измерения ординат на стереокомпараторе «Цейсс» в пределах ± 5 мкм достаточно делать 6 наведений на избранную точку, при этом порядок наведения не имеет значения.

Исследование мертвого хода наводящих винтов выполнялось путем наведения марки прибора на специальную мишу. Разность «завинчивание—вывинчивание» не превышала величины 1 мкм. Это позволяет утверждать, что величину мертвого хода можно не учитывать при обработке снимков на данном измерительном приборе.

* Кривизна фотоизображения солнечного диска изменяется в соответствии с изменениями абсциссы точки наведения.

П—Т — наведение из прозрачной области на границу раздела; Т—П — наведение из темной области на границу раздела.

Выполним теперь априорную оценку точности величины $\delta\rho$, воспользовавшись формулой (2). При этом примем для величин, входящих в формулы (2), (4), (8) и (9), исходные данные:

Z	80°	82°	84°	87°	88°	89°
$(y''-y')$ *	0,005	0,005	0,011	0,07	0,14	0,29
A	1,0044	1,0063	1,0098	1,0241	1,0357	1,0541
λ	1,0409	1,0600	1,0949	1,2277	1,3241	1,4729
r	282''	390''	504''	852''	1080''	1440''
R	960''	$m_{y'}$	± 5 мкм	m	0,003670	$t=5^\circ\text{C}$
m_F	± 1 мм	m_t	$\pm 0,3^\circ$	m_Z	$\pm 1'$	$b=735$ мм
M	206 мм	m_b	$\pm 0,1$ мм	F	1000 мм	

Значения среднеквадратических ошибок аномальных рефракционных искажений солнечного диска приведены ниже:

Z	$m_{\delta\rho}^*$
80°	$\pm 3,97''$
82	4,16
84	4,32
87	5,10
88	5,47
89	10,56

Для апробирования предложенного в работе [1] метода исследования рефракции летом 1975 г. на фотоустановке с $F=1000$ мм были получены фотографии Солнца в диапазоне $77^\circ \leq Z \leq 88^\circ$. Предварительная обработка снимков заключалась в сравнении вертикальных диаметров фотоизображений Солнца с вычисленным с помощью таблиц рефракции ПАО диаметром диска Солнца на соответствующих зенитных расстояниях. Исходя из сравнений, получены аномальные рефракционные искажения диаметра Солнца по формуле:

$$\delta\rho = D_\phi - D_{\text{таб}}. \quad (10)$$

Результаты экспериментальных определений величины $\delta\rho$ следующие:

Z	$\delta\rho$	$m_{\delta\rho}^{**}$
80°	+ 3,8''	$\pm 2,6''$
85	- 2,7	$\pm 2,7$
87	- 8,4	$\pm 3,5$
87,30	- 9,0	$\pm 3,9$
88	-11,1	$\pm 4,5$

Приведенные выше данные позволяют сделать выводы:

* Аномальные рефракционные искажения диска Солнца взяты как разности аномалий рефракции в диапазоне $80^\circ < Z < 89^\circ$ из [2], [3].

** Величина $m_{\delta\rho}$ вычислялась как $m_{\delta\rho}^2 = m_{D_{\text{таб}}}^2 + m_{D_\phi}^2$, где $m_{D_{\text{таб}}}$ определяется формулой (8), а $m_{D_\phi} = m_{y'} \sqrt{2}$, где $m_{y'} = \pm 5,5$ мкм.

1. Соответствие априорной и апостериорной оценок точности свидетельствуют о правильном учете погрешностей от различных источников в фотографическом методе исследования рефракции.

2. В близгоризонтной зоне величины $\delta\rho$ определяются достаточно надежно (ошибки ее определения существенно меньше определяемой величины).

3. Достигнутая точность определения аномальных рефракционных искажений солнечного диска свидетельствует о пригодности предложенного метода для исследования аномальных явлений рефракции вблизи горизонта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Архангельский А. В., Киричук В. В. Об определении аномалий астрономической рефракции по фотографическим наблюдениям Солнца. — «Геодезия, картография и аэрофотосъемка», 1976, вып. 23.

2. Василенко Н. А. Определение астрономической рефракции у горизонта в различные периоды года. — «Астрометрия и астрофизика», 1972, № 3.

3. Киричук В. В. Исследование астрономической рефракции вблизи горизонта. Автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук, Львов, 1972.

4. Таблицы рефракции ПАО. Изд. 4-е, М., Изд-во АН СССР, 1956.

Работа поступила в редколлегию 22 апреля 1976 года. Рекомендована кафедрой теории математической обработки геодезических измерений Львовского политехнического института.