

**А. П. Цапова**

В 1949 г. А. Я. Орлов [1] поставил задачу изучения возможностей определения движения полюсов из систематических наблюдений азимутов мир.

Обычно движение полюса Земли изучают по данным широтных наблюдений. Однако известно, что периодическая составляющая, обусловленная движением полюса, имеет наибольшую амплитуду в результатах азимутальных наблюдений. Именно эта особенность азимутальных наблюдений уже давно привлекала внимание астрометристов. Кроме того, получение ряда азимутальных наблюдений параллельно с рядом наблюдений широты позволило бы определить координаты полюса без данных наблюдений других станций. Следует заметить, что в то время еще не был разработан А. Я. Орловым приближенный способ определения координат полюса по наблюдениям широты на одной только станции. Поэтому использование азимутальных наблюдений было весьма актуально. Но все дело в том, что получение результатов определения азимута земного предмета с достаточной точностью связано с большими трудностями [2, 3].

Для получения данных о движении полюса из широтных наблюдений прежде всего строят сглаженную кривую изменения широты. Нормальные точки кривой обычно получаются с ошибкой от  $\pm 0.03$  до  $\pm 0''.07$  в зависимости от точности наблюдений и количества мгновенных широт, использованных при выводе нормальных значений. Так как амплитуда азимутальных колебаний, вызванных движением полюса на параллели Полтавы, в 1.54 раза больше, чем по наблюдениям широты, можно выделить полярную составляющую вариаций азимута из анализа этих наблюдений, если отдельные нормальные точки кривой будут получены с ошибкой, близкой к  $\pm 0''.10$ .

Микрометрический метод определения азимута земного предмета по наблюдениям близполюсных звезд в элонгации относится к числу точных методов. Хотя он был предложен Л. Б. Мещанским [4] еще в 1929 г., в стационарных условиях такие наблюдения не производились. Представляло определенный интерес испытание этого метода в Полтавской обсерватории с помощью современного пассажного инструмента АПМ-10.

Определение азимута миры сводится к определению азимута звезды, который затем складывается с измеренным микрометром горизонтальным углом между мирой и звездой в момент ее восточной элонгации (в этом направлении построены северные миры [1]). Наведение на миру делается совмещением вертикальной подвижной нити с изображением миры непосредственно до и после наблюдения прохождения близполюсной звезды. Отметим, что при визировании на звезду и миру трубу вращали только по часовой стрелке, чтобы ослабить влияние изменений азимута инструмента в зависимости от направления вращения трубы [5].

Окончательная формула для вывода азимута миры имеет вид

$$A = \frac{1}{2}(A'_E + A'_W) + \frac{c}{2}(\operatorname{cosec} Z_W - \operatorname{cosec} Z_E), \quad (1)$$

где  $A'_E$ ,  $A'_W$  — азимуты миры, полученные при положении окуляра на Est и West соответственно. Они определяются из следующих выражений:

$$\left. \begin{aligned} A'_E &= a_E^* + M_E R - M_E^* R \operatorname{cosec} Z_E - b \operatorname{ctg} Z_E, \\ A'_W &= a_W^* - M_W R + M_W^* R \operatorname{cosec} Z_W - b \operatorname{ctg} Z_W, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где  $a_E^*$ ,  $a_W^*$  — азимут звезды на Est и West,  $M$  — отсчет микрометра при наведении нити на миру;  $M^*$  — отсчет микрометра при наведении нити на звезду;  $R$  — цена оборота винта микрометра;  $b \operatorname{ctg} Z$  — поправка за наклонность оси инструмента.

В выражении (1)  $\frac{c}{2}(\operatorname{cosec} Z_W - \operatorname{cosec} Z_E)$  — поправка за влияние коллимационной ошибки, причем  $c$  — коллимация по наблюдениям звезд, которая определялась из выражения

$$c = \frac{1}{\mu}(A'_E - A'_W),$$

где

$$\mu = \operatorname{cosec} Z_E + \operatorname{cosec} Z_W - 2.$$

Рассмотрим вопрос о теоретически ожидаемой точности определения азимута при определенных условиях. Ошибка азимута (1) состоит из ошибок азимутов миры, полученных при наблю-

дениях на Est и West, и ошибки определения коллимации. Очевидно, ошибки определения  $A'_E$  и  $A'_W$  будут близки между собой, поскольку условия наблюдений в обоих случаях одинаковы. Будем считать эти ошибки равными между собой и рассмотрим подробно ошибку определения  $A'_E$ . Для этого определим ошибку каждого члена, входящего в  $A'_E$ .

1. Ошибка определения азимута звезды  $a'_E$  — первого члена правой части выражения (2), получается дифференцированием известной формулы

$$\operatorname{tg} a = \frac{\cos \delta \sin t}{\cos \varphi \sin \delta - \sin \varphi \cos \delta \cos t},$$

т. е.

$$da = \cos \delta \cos q \operatorname{cosec} Z dt + \sin q \operatorname{cosec} Z d\delta + \sin a \operatorname{ctg} Z d\varphi,$$

где  $\delta$  — склонение наблюдаемой звезды;  $t$  — ее часовой угол;  $\varphi$  — широта пассажного инструмента в Полтаве.

Одним из наивыгоднейших условий определения азимута по наблюдениям близполюсных звезд в элонгации является очень малое влияние ошибки момента прохождения звезды, когда делаются наведения нити микрометра. Следовательно, значение часового угла  $t$  можно брать с небольшой точностью. Ошибка  $d\delta$  имеет постоянный характер и определяется качеством каталога (все звезды нашей программы привязывались к каталогу FK3). Поскольку мы определяем среднюю ошибку одного определения азимута отдельно по каждой звезде, то неточность в склонении здесь не играет роли. Что касается учета изменения собственного движения звезды, то этой величиной всегда приходится пренебрегать не только из-за ее малости, но и потому, что она недостаточно известна. Ошибку в средней широте пассажного инструмента приняли постоянной. Таким образом, ошибки склонений звезд и широты места имеют постоянную величину и при вычислении вариаций азимута не играют роли. Поэтому при рассмотрении вопроса о точности определения азимута мы не будем принимать их во внимание. Ошибки цапф также не принимались во внимание, поскольку наблюдения звезд проводились всегда на одном и том же зенитном расстоянии. Есть основание полагать, что наличие какого-либо дефекта цапф должно искажать наблюдения всегда на постоянную величину. Переменной величиной при наблюдениях будет величина часового угла. Легко проверить, что если неточность в определении часового угла достигает одной секунды времени, то ошибка в

азимуте звезды, зависящая от разности между моментом наведения нити и моментом элонгации, достигает величины  $\pm 0''.02$  при наведениях, сделанных за 3 мин до и через 3 мин после момента элонгации. Эту величину и примем в качестве ошибки определения азимута звезды.

2. Ошибка произведения отсчета микрометра на цену одного оборота микрометра при наблюдении миры

$$m_{MR}^2 = R^2 m_M + M^2 m_R^2,$$

где  $R$  — цена оборота микрометра,  $M$  — отсчет по барабану микрометра, соответствующий максимальной величине смещения подвижной нити, состоит из двух ошибок: ошибки наведения  $m_M$  и ошибки определения  $R$ . Ошибка определения  $R$  была получена ранее [8] и оказалась равной  $\pm 0''.003$ . Ошибка наведения также найдена [6], она равна  $\pm 0^d.0012$ .

3. Ошибка третьего члена в правой части выражения (2), т. е.  $M_E^* R \operatorname{cosec} Z_E$ , определяется аналогично ошибке второго члена:

$$m_{M^* R \operatorname{cosec} Z}^2 = R^2 \operatorname{cosec}^2 Z \cdot m_M + M^{*2} \operatorname{cosec}^2 Z \cdot m_R^2,$$

где  $\operatorname{cosec} Z$  для звезд нашей программы [1] равен 1.5.

4. Ошибка определения наклонности  $b \operatorname{ctg} Z$

$$m_{b \operatorname{ctg} Z}^2 = \operatorname{ctg}^2 Z \cdot m_b^2,$$

где

$$b = \frac{1}{2}(i_E - i_W) \tau,$$

и, значит,

$$m_b^2 = \pm \left[ \frac{1}{2}(i_E - i_W) m_\tau \right]^2 + \left[ \left( \frac{1}{2} \tau \right)^2 m_{i_E}^2 + \left( \frac{1}{2} \tau \right)^2 m_{i_W}^2 \right]. \quad (3)$$

Первый член выражения (3) ничтожно мал, поскольку  $i_E - i_W$  составляет не более двух делений, а средняя ошибка определения цены одного деления уровня равна  $\pm 0''.02$ . Если принять, что максимальная ошибка при отсчете уровня  $m_i = \pm 0^d.1$ , а ошибки отсчета уровня на East и West равны, то из двух положений инструмента получим

$$m_{b \operatorname{ctg} Z}^2 = \operatorname{ctg}^2 Z \frac{\tau^2}{2} m_i^2.$$

Ошибка определения коллимации

$$m_{\frac{c}{2}}^2 (\operatorname{cosec} Z_W - \operatorname{cosec} Z_E) = \left( \frac{\operatorname{cosec} Z_W - \operatorname{cosec} Z_E}{2} \right)^2 m_c^2.$$

Для наших наблюдений величина разности  $\operatorname{cosec} Z_W - \operatorname{cosec} Z_E$  не превосходит 0.01. Величина ошибки коллимации  $m_c$ , определенная по уклонениям отдельных значений коллимации от среднего, оказалась равной  $\pm 2''.35$ .

Таким образом, средняя квадратическая ошибка одного определения азимута

$$m_{\tau} = \pm \sqrt{m_{MR}^2 + m_{M^*R \operatorname{cosec} Z}^2 + m_b^2 \operatorname{ctg} Z + \frac{m_{\frac{c}{2}}^2}{2} (\operatorname{cosec} Z_W - \operatorname{cosec} Z_E)^2 + m_{\alpha^*}^2 + 2\rho(MR)(M^*R \operatorname{cosec} Z) m_{MR} m_{M^*R \operatorname{cosec} Z}}. \quad (4)$$

Последний член под радикалом имеет место, когда  $R$  в процессе наблюдений изменяется и, следовательно, наблюдается линейно-корреляционная зависимость между  $MR$  и  $M^*R \operatorname{cosec} Z$ .

Величина  $R$  определялась дважды: по наблюдениям мир на протяжении всего 1961 г. было получено значение  $R_1 = 51''.717 \pm \pm 0''.003$ , а по наблюдениям мир за период 1962—1963 гг. — значение  $R_2 = 51''.745 \pm 0''.006$ . Для общей обработки азимутальных наблюдений использовалось средневзвешенное значение  $R = 51''.723 \pm 0''.003$ . Поскольку в процессе наблюдений  $R$  не оставалось постоянным, то для проверки корреляционной связи между  $MR$  и  $M^*R \operatorname{cosec} Z$  были вычислены коэффициенты корреляции  $\rho$  для двух звезд нашей программы ( $\delta$  Uг. Min и № 33272). Результаты приводятся ниже:

Годы	$\delta$ Uг. Min	№ 33272
1961	$\pm 0.87$	$\pm 0.79$
1962	$\pm 0.20$	$\pm 0.12$

При вычислении величины ошибки (4) в качестве  $\rho$  взяли среднее его значение для 1961 г., когда линейно-корреляционная связь была максимальной. При этом  $m_{\tau} = \pm 0''.17$ .

Учитывая, что ошибка нормальной точки в несколько раз меньше полученного значения  $m_{\tau}$ , можно заключить, что полярную составляющую в изменениях азимута можно определить.

Перейдем к определению ошибок азимутов непосредственно из наблюдений.

По результатам наблюдений азимутов северной миры с 1961 г. по 1963 г. среднеквадратическую ошибку одного определения азимута находили двумя способами.

1. По отклонениям отдельных значений азимутов от среднего значения за 20—30 дней в предположении, что они отличаются между собой только за счет влияния случайных ошибок. При этом ошибка одного определения азимута в среднем получается  $m_1 = \pm 0''.44$ . (Ошибка азимута южной миры этим способом не вычислялась, поскольку обнаружено очень большое ее смещение.)

2. Предполагая, что изменение состояния инструмента и атмосферных условий за одни сутки пренебрежимо мало, а азимут миры в таком случае меняется только случайно, ошибка одного определения вычислялась по формуле

$$m_2 = \pm \sqrt{\frac{[A_i - A_{i+1}]^2}{2(n-1)}},$$

где  $A_i - A_{i+1}$  — разность двух азимутов, полученных в соседние ночи,  $n$  — количество разностей. Так как наблюдения в осенний и зимний периоды проводились не каждую ночь, нам пришлось брать разности  $A_i - A_{i+1}$  в основном в весеннее и летнее время. Из наблюдений азимутов северной миры таким способом было получено  $m_2 = \pm 0''.30$ .

Таким образом, полученные двумя способами ошибки  $m_1$  и  $m_2$  очень близки между собой. Небольшое их различие можно отнести за счет того, что за 20—30 дней среднее значение азимута претерпевает определенные изменения. Поэтому второй способ определения ошибки азимута нам кажется более надежным. Несколько большие значения  $m_1$  и  $m_2$  по сравнению с  $m_T$  объясняются, по-видимому, тем, что при определении  $m_T$  не могли учитываться изменение состояния инструмента при измерении горизонтального угла между направлением на звезду и миру, возможные смещения длиннофокусной линзы, а также влияние рефракционных аномалий.

Как уже отмечалось, полярная составляющая в изменениях азимута превышает соответствующую составляющую в наблюдениях широты. При максимальном движении полюса амплитуда полярного колебания азимута на параллели Полтавы может достигать  $0''.60$ . При полученной точности азимутальных наблю-

дений такие изменения могут быть определены. К сожалению, на протяжении всего периода наших наблюдений движение полюса было очень мало [6]. Интересно, что Морган [9], выполнивший азимутальные наблюдения с такой же точностью, но в более благоприятный период движения полюса, построил кривую вариаций направления меридиана, происходящих от движения полюса Земли.

Поскольку  $m_1$  и  $m_2$  содержат в себе ошибки наблюдения звезд и ошибки наблюдения мира, мы попытались выделить эти составляющие хотя бы качественно. Так как при определении азимутов северной и южной мир в наблюдениях фигурирует одна и та же звезда, то в разностях азимутов этих мир исключается ошибка, зависящая от наблюдений звезды. В этом случае ошибка определения азимута зависит только от вклада ошибок, возникающих при измерении горизонтального угла между направлениями на звезду и мирами (северной и южной).

Учитывая то, что южная мира имеет линейное смещение около  $5''$  в год, ее азимуты были исправлены. Затем образованы разности азимутов мир «северная минус южная» и по отклонениям этих величин от среднего значения разности найдена ошибка  $m_0 = \pm 0''.90$ . Относительно большое значение ошибки  $m_0$  объясняется неустойчивостью южной мира. Мы исключили только линейный член в ее смещении, а южная мира имеет еще и периодическое смещение [6], которое, естественно, влияет на случайные ошибки.

Чтобы убедиться в том, что большая величина ошибки действительно обусловлена неустойчивостью южной мира, была вычислена ошибка определения азимута южной мира по разностям азимутов, полученных в соседние ночи (как мы это делали для вычисления ошибки определения азимута северной мира вторым способом),  $m_{ю} = \pm 0''.85$ , т. е. она оказалась близкой к  $m_0$ . Поскольку  $m_0$  включает в себя ошибку наблюдения звезды, а  $m_{ю}$  не включает ее, то, по-видимому, влияние ошибок, связанных с наблюдением звезды, на азимут мира незначительно. Основной вклад в ошибку азимута очевидно дают ошибки, связанные с наблюдением мир, так как при этом возможно изменение состояния инструмента при переводе направления на горизонт и смещение столбов, на которых укреплены длиннофокусные линзы, происходящие от влияний нагрева солнцем, неравномерного оседания почвы под фундаментом в сухое время года, ее выпучивание во время мороза, а также большое влияние боковой рефракции в горизонтальном положении трубы.

Укажем на основные результаты, полученные в настоящей работе.

1. Теоретически рассчитанная ошибка одного определения азимута мир по наблюдениям близполюсных звезд в элонгации позволяет предполагать, что из полученных этим способом вариаций азимута можно выделить полярную составляющую.

2. Действительная ошибка азимута миры, полученная непосредственно из наблюдений, не позволяет выделить полярную составляющую в изменениях азимута, для этого необходимо повышение точности этих наблюдений в 2—3 раза.

3. Качественный анализ результатов наблюдений показывает, что вклад ошибок, связанных с наблюдением звезды, в общую ошибку определения азимута небольшой по сравнению с влиянием инструментальных ошибок и боковой рефракции при наблюдении миры.

4. Ошибка определения азимута южной миры оказалась в несколько раз больше ошибки определения азимута северной миры. Это обстоятельство, по-видимому, связано с тем, что она не защищена от метеорологических влияний [1]. Очевидно, фундаменты мир и столбов под длиннофокусные линзы надо тщательно изолировать от метеорологических влияний и в первую очередь от неравномерного притока влаги к основанию фундамента (например, так, как это сделано у нас для северной миры или так, как это предложил делать Сухарев [7]).

Результаты наблюдений азимутов мир представляют собой весьма ценный материал для изучения инструментальных ошибок пассажного инструмента, а главное — причин неустойчивости фундаментов мир и столбов, на которых установлены длиннофокусные линзы, что является предметом наших дальнейших исследований.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Попов Н. А. — Тр. 14-ой астрометрической конференции СССР. Изд-во АН СССР, М., 1960.

2. Compt. rend seances XV Conference Assoc. geod. internat. Berlin, Reimer. 1908, 15, 82, 83.

3. Немиро А. А. — Тр. 2-ой Всесоюзной широтной конференции. Изд-во АН УССР, К., 1950.

4. Венцель М. К. — Тр. Института естествознания и техники АН СССР. 1961, 37.

5. Попов Е. А. Предварительные результаты исследований колебаний широты и движения полюсов Земли. Изд-во АН СССР, М., 1960.



6. Цапова А. П. — В кн.: Изменяемость широт. «Наукова думка», К., 1967.

7. Сухарев Л. А. — Тр. 12-ой астрометрической конференции СССР, 1957.

8. Попов Н. А., Цапова А. П. — В кн.: Вращение Земли. Изд-во АН УССР, К., 1963.

9. Morgan H. R. — Publ. of the United States Naval Observatory, Washington, 1933, 2, 13.

Полтавская гравиметрическая  
обсерватория

## ERRORS OF THE AZIMUTH DERIVED FROM OBSERVATION OF CIRCUM- POLAR STARS IN GREATEST ELONGATION

A. P. TZAPOVA

### S u m m a r y

The paper deals with the accuracy of the azimuth of two marks (northern and southern) determined from observation of circumpolar stars in greatest elongation. The observation was carried out with the transit instrument of the Poltava Observatory in 1961—1963.

It is shown that the largest contribution to a total error is made by the error which is due to turning the tube for setting to a star and to the azimuth mark successively.