

М. И. РУСИН

# ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ АЗИМУТА ПО ЧАСОВОМУ УГЛУ СОЛНЦА ВИЗУАЛЬНЫМИ МЕТОДАМИ

Способы астрономических определений географических координат пункта и азимута направления основаны на измерении горизонтальных координат светил в фиксированные моменты определенной системы счета времени. Программы внедренных в производство способов разработаны для выгоднейших условий наблюдений светил, когда влияние на результат погрешностей измерений и координат пункта минимально. При определении влияния погрешностей экваториальных координат светил условия наблюдений не всегда являются выгоднейшими. Однако эти погрешности, в частности случайные, по сравнению с погрешностями измерений пренебрегаемо малы. Так, случайные погрешности координат звезд каталога КГЗ-2 для эпохи 1975,0, отнесенные к системе *FK4*, в склонениях  $\delta$  имеют значения от 0,08 до 0,19", в прямых восхождениях  $\alpha$  от 0,005° до 0,017<sup>s</sup> (дается  $\varepsilon_\alpha \cos \delta$ ). Точность же измерения горизонтальных координат светил инструментами типа АУ-2"/2" характеризуется средними квадратическими погрешностями одного приема примерно 1".

Систематические ошибки в положениях звезд (систематические ошибки исходных данных) проявляются при использовании для обработки наблюдений различных каталогов — это систематические разности положений  $\Delta\alpha$ ,  $\Delta\delta$  (и собственных движений  $\Delta\mu$ ,  $\Delta\mu'$ ) звезд. Неучтенные систематические разности каталогов *FK3* и *FK4* могут привести к ошибкам: а) в широте  $\varphi$ , определенной по способу Талькотта, до 0,2" в северном и 0,5" в южном полушариях, а в определенной по способу Певцова до 0,4"; б) в долготе  $\lambda$ , определенной по способу Цингера, до 0,03<sup>s</sup> на широте 70°, до 0,02<sup>s</sup> на широте 50...60°; в) в азимуте, определенном по часовому углу Полярной, до 0,3" на широте 50°.

В отношении приближенности географических координат пункта наблюдений примем, что доступная их точность равна точности определений на пунктах Лапласа, т. е. погрешность в широте не превышает 0,4", в долготе — 0,03<sup>s</sup>.

Для решения задач геодезической астрономии кроме звезд используется Солнце. В технологии производства наблюдений Солнца (и их обработки) имеются некоторые особенности, обусловленные, во-первых, тем, что объект наблюдений не точка, а солнечный диск; во-вторых, требуется ослабление яркости изображения Солнца и защита инструмента от прямых солнечных лучей.

Особенности эти несколько усложняют наблюдения Солнца по сравнению с наблюдениями звезд и, как утверждается в [6], обусловливают получение результатов меньшей точности, чем по наблюдениям звезд.

Последнее в большей степени относится к азимутальным определениям.

Изыскание возможности высокоточного определения азимута по визуальным наблюдениям Солнца составляет предмет настоящих исследований.

Рассмотрим погрешности координат Солнца. Случайная погрешность эфемериды Солнца не превышает  $0,03''$  как для прямого восхождения, так и склонения — величина пренебрегаема мала по сравнению с погрешностями измерений.

Систематическая погрешность эфемериды Солнца может достигать  $1''$  для  $\alpha$  и  $0,15''$  для  $\delta$ . Так, разность значений прямых восхождений Солнца, приведенных в АЕ (астрономическом ежегоднике) и полученных из наблюдений [1—3], примерно  $0,07''$ . Сравнительно большую систематическую погрешность в координатах Солнца, особенно в  $\alpha$ , можно объяснить тем, что публикуемая в АЕ эфемериды Солнца основана на теории С. Ньюкома, константы которой выведены из наблюдений XVIII и XIX столетий.

Из анализа известной дифференциальной формулы изменения азимута светила

$$\Delta A = \frac{\cos \delta \cos q}{\sin z} \Delta t + \frac{\sin A}{\operatorname{tg} z} \Delta \varphi + \frac{\sin q}{\sin z} \Delta \delta \quad (1)$$

следует, что при данных значениях погрешностей  $\Delta t$ ,  $\Delta \varphi$ ,  $\Delta \delta$  погрешность азимута Солнца  $\Delta A$  тем меньше, чем больше его зенитное расстояние. Суммарная погрешность  $\Delta A_{\phi, \delta}$  при указанных выше значениях  $\Delta \varphi$  и  $\Delta \delta$  и  $z > 50^\circ$  не превысит  $0,4''$ . При этом для наблюдений Солнца по разные стороны от меридиана она принимает противоположные знаки.

Коэффициент при  $\Delta t = \Delta T + \Delta u - \Delta a$ , выражющий скорость  $V_A$  изменения азимута, представим в виде

$$V_A = \frac{\cos \delta \cos q}{\sin z} = \sin \varphi + \cos \varphi \cos A \operatorname{ctg} z. \quad (2)$$

Следовательно, наибольшую скорость  $V_{A_{\max}} = \cos \delta / \sin z$  Солнце имеет в верхней кульминации. В первом вертикале и у горизонта  $V_A = \sin \varphi$ .

На отрезке суточной параллели между первым вертикалом и горизонтом имеются положения, в которых скорость  $V_A$  становится минимальной. Положения  $z$ ,  $A$  этих точек и скорость  $V_A$  определяются выражениями

$$\cos z = \operatorname{tg} \left( 45^\circ - \frac{z_1}{2} \right),$$

$$\cos A = -\frac{1}{2} \sin \delta \sin z \sec \varphi,$$

$$V_{A_{\min}} = \sin \varphi - \frac{1}{2} \sin \delta \operatorname{tg} \left( 45^\circ - \frac{z_1}{2} \right),$$

где  $z_1$  — зенитное расстояние в первом вертикале.

Тогда выражение (1) для летних дат можно записать в виде

$$\Delta A = \sin \varphi (\Delta T + \Delta u - \Delta z) + \frac{\sin A}{\operatorname{tg} z} \Delta \varphi + \frac{\sin q}{\sin z} \Delta \delta. \quad (4)$$

Систематическая ошибка  $\Delta T$  момента визирования зависит от способа наблюдений. В реализованной методике определения азимута по часовому углу Солнца [4, 5] визирование выполнялось путем наблюдения моментов прохождения краев Солнца через вертикальные нити трубы теодолита, с регистрацией моментов по хронометру методом «глаз—ухо», «глаз—клавиша» или с помощью контактного микрометра. В способе «глаз—ухо»  $\Delta T$  может достигать десятых долей секунды, времени, несколько меньше в способе «глаз—клавиша» и уменьшается до сотых долей секунды при применении контактного микрометра. Погрешность поправки хронометра  $\Delta u = \Delta \lambda \leq 0,45''$ ; о погрешности  $\Delta a$  говорилось выше.

Таким образом, погрешность определения азимута Солнца, обусловленная суммарным влиянием систематических погрешностей исходных данных и измеряемых величин, может достигать нескольких секунд, в основном за счет погрешности  $\Delta t$  часовного угла, особенно ее составляющих  $\Delta T$  и  $\Delta a$ .

Азимут  $a$  направления на земной предмет, определяемый посредством измерения горизонтального угла  $Q$  между предметом и Солнцем, находим по выражению

$$a = A + Q. \quad (5)$$

Следовательно,

$$\Delta a = \Delta A + \Delta Q. \quad (6)$$

Если  $a$  выведено по наблюдениям Солнца симметрично к меридиану, то согласно (4) и (6)

$$\Delta a = \sin \varphi (\Delta T + \Delta u - \Delta z) + \Delta Q. \quad (7)$$

Очевидно, (7) представляет лично-инструментальную поправку способа, подлежащую определению и учету при его реализации.

Переходя в (4) к средним квадратическим погрешностям, запишем

$$m_A^2 = \sin^2 \varphi (m_T^2 + m_u^2 + m_a^2) + \frac{\sin^2 A}{\operatorname{tg}^2 z} m_\varphi^2 + \frac{\sin^2 q}{\sin^2 z} m_\theta^2. \quad (8)$$

Как указывалось выше, случайная погрешность эфемериды Солнца пренебрегаема мала по сравнению с погрешностями измерений. Погрешности  $m_\varphi$  широты и  $m_u$  поправки хронометра, влияющие, как систематические, учтены выше. Строго говоря,  $m_u$  содержит две составляющие:  $m_\lambda$  — погрешность долготы пункта и  $m_{\text{п.,пр.,вр}}$  — погрешность подачи и приема сигналов времени. Влияние второй составляющей случайное, пренебрегаемо мало. Следовательно,

$$m_A = 15 \sin \varphi m_T. \quad (9)$$

Погрешность  $m_T$  зависит от скорости перемещения светила по направлению, перпендикулярному к вертикальной нити, и от некоторых величин, характеризующих метод наблюдения прохождения светила. Значение ее можно рассчитать по известной формуле

$$m_T^2 = \frac{1}{k} \left[ a^2 + \frac{b^2}{(W \cos \delta \cos q)^2} \right], \quad (10)$$

в которой  $k$  — число наблюденных прохождений (число нитей или контактов);  $W$  — увеличение трубы;  $a$  и  $b$  — величины, определяемые по наблюдениям. Ниже приведены их значения для различных методов наблюдений, взятые из [6], и погрешности  $m_T$ , рассчитанные по (10) для  $\varphi$  и  $z$ , равных  $50^\circ$  ( $m_{T_{50}}$ ) и  $70^\circ$  ( $m_{T_{70}}$ ), при  $k=1$ .

Способ наблюдения	$a$	$b$	$m_{T_{50}}$	$m_{T_{70}}$
Глаз—ухо	0,10	4,7	0,19	0,15
Глаз—клавиша	0,07	4,0	0,15	0,11
Контактный				
микрометр	0,04	2,88	0,10	0,07

При наблюдении Солнца визирование выполняется на край видимого его диска, что должно увеличить погрешность момента наблюдения. Из обработки 48 приемов определения азимута по часовому углу Солнца по программе, описанной в [4, 5], с регистрацией моментов методом «глаз—клавиша», получены следующие ее значения:

Край Солнца	КЛ	КП	Среднее
с	0,185 <sup>s</sup>	0,198 <sup>s</sup>	0,192 <sup>s</sup>
п	0,202	0,166	0,184
Среднее	0,194	0,182	0,188

Приведены значения  $m_T$  моментов прохождений правого с и левого п краев диска Солнца, наблюденных при положении

вертикального круга «КЛ» и «КП». Широта пункта наблюдений  $50^\circ$ . Помещенные данные находим следующим образом. Имея  $n$  моментов  $T_i$  наблюдений одного из краев Солнца в полуприеме, вычисляем разности  $\Delta T_i = T_{i+1} - T_i$ . По отклонениям отдельных значений разностей от их среднего находилась погрешность разности, затем  $m_T$  — средняя квадратическая погрешность момента прохождения.

Из обработки другой группы (100 приемов) определений азимута по часовому углу Солнца для метода «глаз—клавиша» получено  $m_T = 0,16^\circ$ , при применении контактного микрометра  $m_T = 0,13^\circ$  [4]; для метода «глаз—ухо» из 21 приема получено  $m_T = 0,25^\circ$ .

Аналогичным путем выведено значение  $m_T$  наблюдения звезд при определении азимута из их наблюдений в меридиане по программе и методике, описанной в [6], с применением контактного микрометра: обработано 18 приемов, получено  $m_T = 0,115^\circ$ .

Следовательно, случайная погрешность момента наблюдения Солнца больше, чем при азимутальных наблюдениях звезд примерно в 1,3—1,5 раза. Однакового ее влияния на конечный результат можно достичь соответствующей методикой наблюдений, например, реализованной в [4, 5].

Ниже приведен предрасчет ожидаемой погрешности азимута земного предмета, определенного по часовому углу Солнца, одним приемом по программе, описанной в [4]:

Способ наблюдения	$m_T$	$m_{A_T}$	$k$	$m_{A_T}$	$m_{A_\Sigma}$	$m_{z,p}$	$m_a$
Глаз—ухо	0,25	$3,8'' \sin \varphi$	20	$0,9'' \sin \varphi$	$< 1,1''$	0,7''	1,3''
Глаз—клавиша	0,17	$2,6 \sin \varphi$	20	$0,6 \sin \varphi$	$< 0,9''$	0,7	1,1
Контактный микрометр	0,13	$2,0 \sin \varphi$	40	$0,3 \sin \varphi$	$< 0,7''$	0,7	1,0

Здесь  $m_{A_T}$  — средняя квадратическая погрешность (с. к. п.) азимута  $A$  Солнца, обусловленная погрешностью одного визирования;  $k$  — число визирований на Солнце в приеме;  $m_{A_T}$  — с. к. п. азимута  $A$ , выведенного при  $k$  визирований;  $m_{A_\Sigma}$  — с. к. п. азимута  $A$  с учетом погрешностей визирования, горизонтального лимба, наклона горизонтальной оси;  $m_{z,p}$  — с. к. п. измеренного направления на земной предмет в горизонте;  $m_a$  — с. к. п. азимута земного предмета.

Влияния неучтенных случайных погрешностей (кручение столба, боковое гнущие трубы, боковая рефракция и др.) могут иметь значение, равное  $M_A$ . С учетом этих влияний погрешность азимута земного предмета из одного приема будет в методе «глаз—ухо»  $< 2''$ , «глаз—клавиша»  $< 1,5''$ , при применении контактного микрометра  $< 1,3''$ . Выполнив программу из 18 приемов, получим результат с погрешностью, не превышающей  $0,5''$  при любом методе наблюдений.

Ниже, где  $n$  — число приемов, приведены результаты определений азимута земного предмета по часовому углу Солнца, с применением различных, в основном двух первых, методов наблюдений теодолитом АУ-2/10 [4, 5].

$z$	70—80°	65—70°	55—65°	45—55°	35—45°
$n$	9	13	9	7	10
$m_a$	1,09"	1,52"	2,12"	2,28"	2,83"

Результаты сгруппированы по степени соответствия их выгоднейшим условиям наблюдений, определяемых формулами (3). Для данной группы наблюдений точка суточной параллели Солнца, в которой азимутальная его скорость минимальна, находится в пределах  $z$  от 75 до 85°.

Следовательно, реализация предложенной в [4, 5] методики определения азимута по часовому углу солнца визуальными методами обеспечивает результат со средней квадратической погрешностью, допустимой для определений на пунктах первого класса.

Систематическая погрешность  $\Delta a$  азимута, определяемого данным способом, как указывалось выше, несколько секунд (в основном за счет влияний погрешностей  $\Delta T$  и  $\Delta z$ ). Для ее определения нужно эталонировать предлагаемую технологию измерений. Наиболее доступный путь эталонирования — сравнение ее результата с результатом апробированного практикой способа, например, по часовому углу Полярной. Разность  $\Delta a$  азимутов  $a_c$  направления земного предмета, определенного по часовому углу Солнца, и  $a_p$  — по часовому углу Полярной, согласно (7), определяем выражением

$$a_c - a_p = 15(\Delta T + \Delta u - \Delta z) \sin \phi, \quad (\Delta Q = 0). \quad (11)$$

Пренебрегая погрешностью  $\Delta u$ , из (11) получаем

$$\Delta T - \Delta z = \Delta t = \frac{\Delta a}{15} \operatorname{cosec} \phi - \quad (12)$$

поправку в измеренный часовой угол Солнца. После ее введения, неучтанным является систематическое влияние случайной погрешности долготы пункта, которое характеризует остаточную систематическую погрешность способа.

Ниже приведены результаты определений поправки  $\Delta t$  посредством сравнения предлагаемой методики с методикой определения азимута по Полярной:

	Солнце	Полярная	Разность	Поправка
$n$	47	52	—	—
$a$	28,38"	29,95"	$a_p - a_c = +1,57''$	$\Delta t_{cp} = +0,14 \pm 0,03''$
$m_a$	2,02	1,89	—	—

Здесь  $n$  — количество приемов,  $a$  — азимут земного предмета из  $n$  приемов,  $m_a$  — средние квадратические погрешности результата одного приема.

С целью исключения возможного появления погрешностей визирования вследствие различного восприятия визирной цели ночью и днем наблюдения Полярной выполнялись как ночью, так и днем, причем днем Полярная наблюдалась в «спаренных» приемах с Солнцем. В данном приеме визирование произведено на земной предмет, Солнце и Полярную.

Таким образом, визуальный метод определения азимута по часовому углу Солнца при реализации его посредством предлагаемой методики (и соответствующих приборов) обеспечивает точность результата, сравниваемую с точностью определений на пунктах Лапласа.

1. Гневышева К. Г. Об опытных наблюдениях Солнца с меридианным кругом Тепфера в Пулкове // Тр. 15-й астрономической конференции СССР. 1963. С. 18.
2. Петров Г. М. Результаты предварительного исследования прямых восхождений Солнца, полученных в Николаеве на пассажном инструменте в 1960—1963 гг. // Изв. ГАО. 1971. С. 41—50.
3. Положенцев Д. Д. Опыт наблюдения Солнца на пассажном инструменте Цейсса в Пулково // Тр. 21-й астрономической конференции СССР. 1963. С. 65—71.
4. Русин М. И. и др. О точности определения азимута по часовому углу Солнца // Геодезия, картография и аэрофотосъемка. 1988. Вып. 47. Т. 59—61.
5. Русин М. И. Непосредственное определение дирекционного угла по Солнцу // Геодезия, картография и аэрофотосъемка. 1988. Вып. 48. С. 79—82.
6. Уралов С. С. Курс геодезической астрономии. М., 1980.