УДК 622.1:528.41

И.С.ПАНДУЛ, *канд. техн. наук, доцент, spmi – ig @ yandex.ru*
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург

I.S.PANDUL, *PhD in eng. sc., associate professor, spmi – ig @ yandex.ru*
National Mineral Resources University (Mining University), Saint Petersburg

ОПРЕДЕЛЕНИЕ АСТРОНОМИЧЕСКИХ АЗИМУТОВ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ГОРНЫХ РАБОТ И ПОДЗЕМНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

Маркшейдер, использующий в своей работе условную систему прямоугольных координат, должен уметь определять астрономические азимуты. В статье изложен способ астрономического ориентирования по наблюдениям Солнца. Способ не требует точного знания времени наблюдений. Изложены принцип и методика наблюдений, дан пример вычислений.

Ключевые слова: астрономический азимут, Солнце.

DETERMINATION OF ASTRONOMICAL AZIMUTH FOR MINING AND UNDERGROUND WORKINGS SUPPORT

Mine surveyor, using in his work the nominal system of rectangular coordinates, should know how to determine astronomical azimuth. The method of astronomical orientation based on the San observation is expounded in the article. This method is easy and not involving any information about exact time of observation. In addition, there is an example of calculating the azimuth of distant point.

Key words: astronomical azimuth, the Sun.

Маркшейдер, работающий на объектах, расположенных в труднодоступных местах, для маркшейдерского обеспечения горных выработок использует условную систему плоских прямоугольных координат, ось абсцисс которой ориентируют по астрономическому азимуту. Для выполнения этой работы маркшейдер должен уметь определять астрономические азимуты направлений. Определение азимутов по звездам требует ночных наблюдений и световых визирных целей. При выполнении маркшейдерских работ в высоких широтах наблюдения звезд невозможны в периоды полярного дня. Но, главное, при наблюдении звезд необходим хороший звездный хронометр.

Рассмотрим метод астрономического ориентирования по наблюдениям Солнца. Его применяют тогда, когда у маркшейдера нет звездного хронометра. Способ рекомендуется для определения азимута с точностью ±(15-20)" и грубее. Для работы необходимы теодолит, часы, термометр и барометр-анероид. Для вычислений необходимо знать широту и долготу места (берутся с карты масштаба 1:100000 или крупнее) и иметь три таблицы из Астрономического ежегодника (АЕ) на текущий год. Их можно легко ксерокопировать в любой республиканской библиотеке. Первая таблица – эфемерида Солнца (АЕ, с.10-24) содержит видимое склонение и радиус Солнца. Вторая таблица (АЕ, с.34) содержит суточный параллакс Солнца. Третья таблица (АЕ, с.620) служит для вычисления астрономической рефракции.

Зная широту места и склонение Солнца в момент наблюдений (интерполируют по эфемериде «Солнце» в АЕ), можно по формуле

$$\sin\delta = \sin\varphi\cos z + \cos\varphi\sin z\cos A$$

вычислить азимут Солнца A и от него перейти к азимуту направления A_Δ на земной предмет, пользуясь формулами

$$M_N = P - A,\ A_\Delta = B - M_N,$$

где M_N – место севера; P – направление на Солнце; B – направление на земной предмет.

Применяя этот способ, наблюдатель может обходиться без выверенных часов, поправку которых достаточно знать с точностью 5-10 мин. Обычно в приеме выполняют восемь наведений на Солнце (при определениях пониженной точности – четыре). Для учета астрономической рефракции в каждом приеме измеряют температуру и атмосферное давление воздуха.

Время прохождения Солнцем первого вертикала – около 6 и 18 ч истинного солнечного времени. Зимой Солнце пересекает первый вертикал под горизонтом, поэтому наблюдать его надо в возможной близости к первому вертикалу. Однако следует помнить, что если зенитные расстояния больше 80°, то значение рефракции становится ненадежным и измерять зенитные расстояния в этих условиях не следует. Для исключения остаточной ошибки знания широты места рекомендуется наблюдать светило и утром и вечером симметрично относительно меридиана наблюдателя.

По мере удаления от первого вертикала и уменьшения зенитного расстояния погрешность ΔA возрастает. Поэтому не следует определять азимут по зенитным расстояниям Солнца на удалении от первого вертикала более чем на 50°. Перед началом наблюдений надо приготовить к работе теодолит, часы, термометр и барометр-анероид. Особое внимание следует уделить определению места зенита до и после наблюдений. Минутную стрелку часов поставить так, чтобы она находилась точно на минутном делении, когда секундная стрелка проходит через нулевое деление.

В процессе наблюдений визирование на земной предмет производят обычным порядком, а на Солнце зенитные расстояния измеряют способом наблюдения прохождения верхнего или нижнего края видимого диска Солнца через горизонтальную нить трубы теодолита, неподвижно установленную по высоте. Каждое прохождение фиксируют отсчетом по часам с последующими отсчетами по вертикальному и горизонтальному кругам теодолита.

При наблюдении контакта края Солнца с горизонтальной нитью средняя вертикальная нить трубы должна располагаться строго по центру диска Солнца. Для этого наводящим винтом трубы устанавливают горизонтальную нить в такое положение, чтобы верхний или нижний край изображения Солнца в результате суточного движения через несколько секунд пришел с соприкосновение с нею. Оставляя трубу теодолита неизменной по высоте, вращением наводящего винта алидады удерживают вертикальную нить на середине диска Солнца. В момент касания края диска с горизонтальной нитью командуют: «Есть!». По этой команде помощник отмечает показания часов и записывает полные отсчеты по кругам теодолита в журнал наблюдений. Установку вертикальной нити трубы теодолита по центру диска Солнца надо выполнять особенно тщательно. Полный прием наблюдений состоит из следующих действий.

Первый полуприем – круг право (лево): 1) наведение трубы теодолита на земной предмет и отсчет по горизонтальному кругу; 2) установка темного светофильтра на окуляр; 3) два последовательных наблюдения касания изображения верхнего края диска Солнца с горизонтальной нитью; отсчеты по часам, вертикальному и горизонтальному кругам теодолита; при каждом визировании на Солнце пузырек уровня при алидаде вертикального круга приводить на середину; 4) два наблюдения касания изображения нижнего края диска Солнца с горизонтальной нитью; отсчеты по часам, вертикальному и горизонтальному кругам теодолита; 5) снятие светофильтра с окуляра; 6) повторное наведение трубы теодолита на земной

Таблица 1

Определение азимута направления по Солнцу
Журнал наблюдений

8 июня 2009 г. Столб 10 Теодолит 4Т-02 № 10650
MZ = 359°59'53,8" $\ell_0 = 1^h\,57^m\,24{,}9^s\,O^{st}$ Хронометр средний, № 14552
$u_{хр} = +\,20{,}0^s$ $\varphi_0 = 57°29'30"N$ B = 988,95 ГПа (741,9 мм рт.ст.)
Прием 3 $t° = +\,19{,}0°$ Предмет: пункт триангуляции Клинцы

№ п/п	Наблюдаемый край	Круг	Отсчеты по часам	Отсчеты по вертикальному кругу			Отсчеты по горизонтальному кругу		
1	Клинцы	П					60° 20'	12,0/12,1	24,1"
2	Ф		$20^h\,10^m\,40{,}0^s$	80° 56'	55,4/55,4	110,8"	278° 14'	07,2/07,0	14,2
3	Ф		12 05,0	81 02	42,7/42,4	85,1	278 30	32,2/32,0	64,2
4	Ф		12 59,5	81 22	19,1/19,0	38,1	278 40	46,5/46,3	92,8
5	Ф		13 49,5	81 24	55,6/55,5	111,1	278 52	07,8/07,5	15,3
6	Ф						60 20	12,2/12,4	24,6
	Клинцы								
7	Клинцы	Л					240° 20'	12,5/12,9	25,4"
8	Ф		20 19 20,0	98 28	16,1/16,1	32,2"	99 56	52,5/56,2	104,6
9	Ф		20 30,5	98 24	00,0/00,1	00,1	100 10	56,5/56,2	112,7
10	Ф		21 41,0	98 02	52,6/52,3	104,9	100 24	53,8/53,4	107,2
11	Ф		22 47,5	97 58	46,4/46,5	92,9	100 38	27,9/27,9	55,8
12	Ф						240 20	13,8/14,3	28,1
	Клинцы								

$\Delta_П = +\,0{,}5"$. $\Delta_Л = +\,2{,}7"$. $2c_1 = -\,1{,}3"$. $2c_б = -\,3{,}5"$. $2c = -\,2{,}2"$

Таблица 2

Сводка результатов наблюдений

№ п/п	Объект наблюдений	Круг	Показания часов	Показания вертикального круга	Показания горизонтального круга
8 июня 2009 г. Прием 3. MZ = 359° 59' 53,8". $u_{хр} = +\,20{,}0^s$. $t° = +\,19{,}0$ °С. B = 988,95 ГПа (741,9 мм рт. ст.)					
1	Клинцы	П			60° 20' 24,1"
2	Ф		$20^h\,10^m\,40{,}0^s$	80° 57' 50,8"	278 14 14,2
3	Ф		12 05,0	81 03 25,1	278 31 04,2
4	Ф		12 59,5	81 22 38,1	278 41 32,8
5	Ф		13 49,5	81 25 51,1	278 52 15,3
6	Ф				60 20 24,6
	Клинцы				
	$B_{ср}$				60 20 24,4
7	Клинцы	Л			240° 20' 25,4"
8	Ф		20 19 20,0	98 28 32,2	99 57 44,6
9	Ф		20 30,5	98 24 00,1	100 11 52,7
10	Ф		21 41,0	98 03 44,9	100 25 47,2
11	Ф		22 47,5	97 59 32,9	100 38 55,8
12	Ф				240 20 28,1
	Клинцы				
	$B_{ср}$				240 20 26,8

предмет и отсчеты по горизонтальному кругу; 7) отсчеты показаний наружного термометра и барометра-анероида.

Второй полуприем – круг лево (право): повторение всех действий первого полуприема. Обычно выполняют два-четыре таких приема с перестановкой лимба горизонтального круга на величину $180°/m$, где m – число приемов. Пример заполнения журнала наблюдений при определении азимута по

зенитным расстояниям Солнца приведен в табл.1. На правильность отметок наблюдений краев Солнца следует обратить особое внимание, так как они показывают, с каким знаком в измеренное зенитное расстояние надо вводить поправку за видимый радиус Солнца $R_\odot$. Нижним краем диска всегда будет тот край Солнца, который в действительности ближе к горизонту, независимо от того, как он виден в трубу теодолита. Чтобы не перепутать края Солнца и правильно учесть $R_\odot$, достаточно помнить, что до кульминации (на востоке) Солнце поднимается над горизонтом, а после кульминации (на западе) – опускается к горизонту. По направлению суточного движения Солнца в поле зрения трубы и по времени наблюдений легко определить, какой край диска касается горизонтальной нити.

Обработка журнала заключается в определении сходимости двух отсчетов в начале и в конце полуприема (для теодолита Т2 допуск 8") и в контроле двойной коллимационной ошибки – допуск 12" между приемами. После обработки журнала составляют «в две руки» сводку результатов наблюдений (табл.2), по которой ведут дальнейшие вычисления азимута направления на земной предмет.

Последовательность вычисления азимута следующая:

1. Вычисляют видимое склонение Солнца для начала и конца каждого полуприема (табл.3) по формуле

$$\delta = \delta_0 + M^*[v_{\delta 0} + (M^*/48)\Delta v_\delta],$$

где δ_0 – табличное значение склонения в АЕ на дату наблюдений; M^* – земное время.

Приближенное земное время, необходимое для интерполирования склонения Солнца на момент наблюдений, находят по формуле

$$M^* = T_{хр} + u_m + \Delta T - (n + 2\ ч),$$

где $T_{хр}$ – отсчет по часам; n – номер часового пояса; поправку ΔT см. в АЕ на с.627.

Таблица 3

Вычисления для определения азимута Солнца

Схема вычислений	КП		КЛ	
	Номер наведения (см. табл.2)			
	2	5	8	11
Вычисление суточного параллакса Солнца				
$\pi_\odot$ sin$z$ p	8,67" 0,9510 8,24"	8,67" 0,9559 8,29"	8,67" 0,9568 8,30"	8,67" 0,9616 8,34"
Вычисление видимого склонения Солнца				
$T_{хр}$ u ΔT	$20^h\ 10^m\ 40{,}0^s$ +20,0 +66,0	$20^h\ 13^m\ 49{,}5^s$	$20^h\ 19^m\ 20{,}0^s$	$20^h\ 22^m\ 47{,}5^s$
M^* $(M^*)^h$ $M^*/48$ δ_0 $v_{\delta 1}$ $v_{\delta 0}$	16 12 06,0 16,202 0,338 22° 50' 15,6"N +12,56 +13,56	16 15 15,5 16,254 0,339	16 20 46,0 16,346 0,340	16 24 13,5 16,404 0,342
Δv_δ $(M^*/48)\ \Delta v_\delta$ $v_{\delta 0} + (M^*/48)\Delta v_\delta$ $\Delta\delta$ δ	–1,00 –0,338 +13,22 +214,19" 22 53 49,8 N	–1,00 –0,339 +13,22 +214,88" 22 53 50,5 N	–1,00 –0,340 +13,22 +216,09" 22 53 51,7 N	–1,00 –0,342 +13,21 +216,70" 22 53 52,3 N

Таблица 4

Вычисление поправки истинной астрономической рефракции

Схема вычислений	Номера наведения							
	2	3	4	5	8	9	10	11
z'	71° 56'	72° 07'	72° 45'	72° 52'	73° 03'	73° 12'	73° 52'	74° 01'
μ lg tg z' γ γ(λ – 1) B	1,7594 0,4865 –137 – 2 – 105	1,7593 0,4912	1,7590 0,5079	1,7589 0,5111	1,7588 0,5160 – 137 2 – 105	1,7587 0,5201	1,7583 0,5387	1,7582 0,5430 – 137 – 2 – 105
lg ρ	2,2215	2,2261	2,2425	2,2456	2,2504	2,2544	2,2726	2,2768
ρ	+166,54"	+168,31"	+174,79"	+176,04"	+177,99"	+179,64"	+187,33"	+189,15"

Таблица 5

Вычисление азимута на примере одного измерения зенитного расстояния Солнца

Схема вычислений	Вычисления	Пояснения
$z_\odot$	72°14'12,9"	Геоцентрическое зенитное расстояние Солнца
$\delta_\odot$	22 53 49,8 N	Видимое склонение Солнца (см. табл.3)
sec φ	1,860 734	φ = 57° 29' 30"N
sin $\delta_\odot$	0,389 078	
coseec $z_\odot$	1,050060	
x	+0,760 213	$x = \sec\varphi\sin\delta_\odot\operatorname{cosec} z_\odot$
tg φ	1,569 182	
ctg $z_\odot$	0,320 354	
y	+0,502 694	$y = \operatorname{tg}\varphi\operatorname{ctg} z_\odot$
$x - y$	+0,257 519	$x - y = \cos a$
a	75 04 37,6	
Четверть	IV	
$A_\odot$	284 55 22,4	Искомый азимут Солнца
P	278 14 14,2	Значение горизонтального направления на Солнце (см. табл.2)
M_N	353 18 51,8	Место севера $M_N = P - A_\odot$
$B_{ср}$	60 20 24,4	Среднее значение направления на земной предмет (см. табл.2)
$M_{N\,ср}$	353 18 37,8	Среднее значение места севера в полуприеме
$A_{астр}$	67 01 46,6	Азимут земного предмета из полуприема

2. Видимые зенитные расстояния каждого наблюденного края Солнца вычисляют по формуле

$$z' = \text{Л} - \text{MZ} = \text{MZ} - \text{П}.$$

3. Значения суточного параллакса Солнца (см. табл.3) для начала и конца полуприема вычисляют по формуле

$$p = \pi_\odot \sin z.$$

4. Для каждого наблюдения Солнца вычисляют поправки за астрономическую рефракцию (табл.4) .

5. На средний момент приема выбирают из АЕ видимый средний радиус Солнца и записывают в полную ведомость вычислений.

6. Вычисляют геоцентрические зенитные расстояния Солнца (табл.5) по формуле

$$z_\odot = z' + \rho - p \pm R_\odot.$$

7. На моменты каждого наблюдения вычисляют азимуты Солнца как

$$\cos A_\odot = x - y,$$

где $x = \sec\varphi\,\sin\delta_\odot\operatorname{cosec} z_\odot$; $y = \operatorname{tg}\varphi\,\operatorname{ctg} z_\odot$.

8. По формуле $M_N = P - A$ вычисляют место севера M_N для каждого наблюдения Солнца отдельно и определяют средние значения в каждом полуприеме. Следует помнить, что из-за неточного знания места зенита место севера при КП и КЛ может значительно различаться. Критерием сходимости результатов наблюдений служит сходимость значений азимута, полученных из полуприемов.

9. В каждом полуприеме по формуле $A_\Delta = B - M_N$ вычисляют азимут направления на земной предмет и выводят среднее значение $A_{астр.ср}$ из приема.

10. За вероятнейшее значение азимута направления берут среднее арифметическое из значений всех исполненных на пункте приемов наблюдений.

Порядок вычисления азимута земного предмета по одному измерению зенитного расстояния Солнца приведен в табл.5.

Дальнейшие вычисления производятся в том же порядке.

Переход от астрономического азимута к дирекционному углу α_{12} следует осуществлять по формуле

$$\alpha_{12} = A_\Delta - \gamma_{астр} + \delta_{12},$$

где $\gamma_{астр}$ – сближение меридианов, вычисленное по астрономическим широте и долготе,

$$\operatorname{tg} \gamma_{астр} = \operatorname{tg} (\lambda - L_0) \sin,$$

значение λ берут с карты; L_0 – долгота осевого меридиана шестиградусной зоны.

Значение δ_{12} – поправку за кривизну геодезической линии на плоскости – можно вычислить по формуле

$$\delta_{12} = -16 S_{12} \cos\varphi \operatorname{tg}(\lambda - L_0) \cos A_\Delta,$$

где S_{12} – расстояние от пункта наблюдения до земного предмета, км.

Предлагаемый способ позволит шире внедрить определение астрономических азимутов направлений в практику маркшейдерского обеспечения горных работ и подземного строительства.